

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина».

На правах рукописи



Парфёнов Сергей Юрьевич

**“Об излучении метанола в дисках вокруг
молодых звездных объектов”**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к.ф.-м.н. Соболев А.М.

Екатеринбург – 2016

Оглавление

Введение	4
Главы	
1 Не-ЛТР расчеты переноса излучения метанола в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца	12
1.1 Введение	12
1.2 Модель	15
1.2.1 Физическая структура диска	15
1.2.2 Химическая модель диска	16
1.2.3 Химическая модель с учетом турбулентности и обилие метанола	17
1.2.4 Структура диска, используемая для расчета переноса излучения	20
1.2.5 Схема энергетических уровней метанола, вероятности радиативных и столкновительных переходов	21
1.2.6 Не-ЛТР расчеты переноса излучения	23
1.3 Результаты	25
1.3.1 Ламинарная химическая модель диска	26
1.3.2 Турбулентная химическая модель диска	33
1.4 Обсуждение	41
1.5 Заключение	46
2 Мазеры метанола II класса в дисках вокруг массивных звезд: периодическая переменность мазеров	48
2.1 Введение	48
2.2 Модель диска	50
2.2.1 Общее описание	50
2.2.2 Моделирование с помощью CLOUDY	52

2.2.3	Физические условия в диске	56
2.3	Моделирование мазеров метанола II класса	60
2.4	Выводы	65
3	Мониторинг источника V645 Cyg в оптическом и радио диа-	
	пазонах	68
3.1	Введение	68
3.2	Данные мониторинга в оптическом и радио диапазонах	70
3.3	Обсуждение	73
3.3.1	Область формирования мазеров метанола II класса	73
3.3.2	Возможные причины переменности мазеров метанола II	
	класса	77
3.4	Заключение	79
	Заключение	80
	Список библиографических ссылок	86
	Приложения	
	Приложение А. Оценка неопределенности плотностей потоков в лини-	
	ях метанола в модели протопланетного диска вокруг звезды типа	
	DM Тельца	105
	Приложение Б. Расчет модели аккреционного диска с помощью	
	CLOUDY	110

Введение

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Планеты образуются из газа и пыли в дисках, окружающих молодые звезды. Физические свойства и химический состав дисков определяют структуру формирующейся планетной системы и состав первичных атмосфер планет. Богатство различных органических соединений, в том числе аминокислот, найденных в углеродистых метеоритах и кометной пыли в нашей Солнечной системе [1–4], указывает на то, что в дисках, в которых формируются планеты, есть органические (пребиотические) молекулы. Одной из наиболее важных проблем теории образования планет является понимание того, как протекают химические реакции с участием органических молекул в этих дисках, и того, какая доля этой органики может достигать поверхности планет. Одну из основных ролей в решении этой проблемы играют наблюдения дисков в линиях сложных молекул. Нужно отметить, что данные наблюдения могут быть весьма осложнены, особенно в дисках вокруг звезд малой массы. Сложности могут быть связаны с относительно низким обилием сложных молекул в газовой фазе, большим числом уровней энергии в молекулах, малыми угловыми размерами дисков и ограниченной чувствительностью наблюдательных инструментов. Введение в строй таких инструментов, как радиointерферометр Atacama Large Millimeter Array (ALMA) в некоторой степени позволяет решить эти проблемы. В частности, согласно оценкам, например Walsh et al. [5], становится возможным обнаружение вращательных линий метанола (CH_3OH) в ближайших дисках вокруг звезд малой массы. Метанол является важным звеном в образовании более сложных органических молекул, таких как этил эфир ($\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_3$) и этил формат ($\text{HCOOCH}_2\text{CH}_3$), в газовой фазе и на поверхности пылинок (см., например, [6–9]). Для повышения вероятности обнаружения излучения в линиях

сложных молекул, таких как метанол, и для интерпретации данных наблюдений большое значение имеет моделирование химических процессов и переноса излучения в линиях сложных молекул в дисках вокруг звезд типа Т Тельца и Ae/Be звезд Хербига.

Метанол наблюдается в направлении на области образования массивных звезд. При этом, помимо теплового, наблюдается также мазерное излучение. Наблюдения мазеров метанола I и II класса играют важную роль в исследовании физических условий и кинематической структуры этих областей (см., например, [10, 11]). Согласно одной из гипотез, мазеры CH_3OH II класса могут образовываться в аккреционных дисках вокруг массивных молодых звездных объектов (см., например, Norris et al. [12]).

У значительной части наблюдаемых мазерных источников наблюдается переменность плотности потока излучения со временем (см., например, Niezurawska et al. [13]). Мазеры образуются при определенных физических условиях, и переменность мазеров может свидетельствовать об изменениях условий в областях формирования мазеров и/или в областях, которые влияют на накачку мазеров. Некоторые мазеры метанола II класса, ассоциирующиеся с массивными молодыми звездными объектами, демонстрируют периодическую переменность (см., например, Goedhart et al. [14]). Для объяснения периодической переменности этих мазеров было предложено несколько гипотез, согласно которым переменность мазеров может быть связана с вариациями фонового излучения усиливаемого мазерами (van der Walt [15]) или с изменениями условий накачки мазеров (Araya et al. [16], Inayoshi et al. [17]). Однако ни одна из гипотез не позволяет полностью интерпретировать все данные наблюдений во всех мазерных источниках с подтвержденной периодической переменностью (см., например, Szymczak et al. [18]).

Среди мазеров метанола II класса, которые демонстрируют нерегулярную переменность, можно выделить мазеры, ассоциирующиеся с объектом V645 Cyg. По различным данным наблюдений можно предположить, что V645 Cyg представляет собой довольно редкий класс очень молодых В-звезд, которые ещё не совсем освободились от плотного газа в своем ближайшем окружении (см., например, Мирошниченко и др. [19]). Из-за плотных окружающих оболочек газа и пыли наблюдения подобных объектов и в целом объектов, с которыми ассоциируются переменные мазеры, в оптическом диапазоне могут быть затруднены или невозможны. Но V645 Cyg в некотором роде является уникальным источником, так как его блеск в оптическом диапазоне относитель-

но велик ($m_V \sim 13$). Это открывает возможность одновременного мониторинга этого объекта в оптическом диапазоне и в радиолиниях метанола. Подобные наблюдения могут играть важную роль в исследованиях механизмов переменности мазеров метанола II класса.

Цели и задачи исследования

Основными задачами исследования являются:

- 1) Выполнить расчеты переноса излучения в линиях метанола с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР) на основе модели протопланетного диска вокруг звезды типа DM Тельца. Оценить время, необходимое для обнаружения линий метанола в (суб-)мм диапазоне длин волн при наблюдениях на ALMA.
- 2) С целью объяснения периодической переменности мазеров метанола II класса рассмотреть модель аккреционного диска вокруг двойной звезды, включающей массивный компонент и компонент промежуточной массы, с учетом наличия вращающейся спиралевидной ударной волны в центральной области диска. Рассчитать физические условия – температуру газа и пыли, поле излучения – в некоторой области диска в момент, когда на луче между этой областью и массивным компонентом есть газ нагретый ударной волной (далее, момент покрытия массивного компонента), и в момент, когда на луче этого газа нет (далее, момент после покрытия). Исследовать влияние покрытия массивного компонента двойной системы горячим газом, нагретым спиральной ударной волной в центральной области диска, на яркость метанольных мазеров II класса, образующихся в аккреционном диске.
- 3) Представить и проанализировать предварительные результаты мониторинга объекта V645 Cyg, который проводился в оптическом диапазоне в фильтрах V и R и в мазерной радиолинии метанола на 6.7 ГГц.

Основные результаты, выносимые на защиту

- 1) Плотности потоков излучения метанола в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца в ЛТР и не-ЛТР приближении могут отличаться

на два порядка величины. Отношение наиболее интенсивных линий метанола чувствительно к физическим условиям в диске. Излучение метанола может быть обнаружено при наблюдениях на ALMA в течение трех часов. В рассмотренной модели диска вокруг DM Тельца не образуется мазеров метанола в (суб-)мм диапазоне длин волн.

- 2) В модели аккреционного диска вокруг массивной двойной звезды физические условия в диске в момент покрытия массивного компонента горячим газом за спиральной ударной волной отличаются от условий в момент после покрытия. Изменения физических условий в момент покрытия приводят к изменению оптической толщины в мазерных линиях, формирующихся в диске. Величина изменения оптической толщины во время покрытия зависит от вязкости диска, а также от места формирования мазеров в диске. Во время покрытия мазерное усиление в некоторых мазерных переходах может сменяться поглощением.

Научная новизна результатов

- 1) Впервые проведены не-ЛТР расчеты переноса излучения в линиях метанола в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца с использованием схемы уровней метанола, включающей вращательные уровни нижних возбужденных крутильных состояний. Впервые не-ЛТР расчеты переноса излучения в линиях метанола выполнены для модели протопланетного диска, учитывающей перенос вещества за счет турбулентности.
- 2) Впервые были рассчитаны физические условия в аккреционном диске вокруг массивной двойной при вариациях засветки диска, связанных с наличием вращающейся спиральной ударной волны в центре диска. На основе этих расчетов предложена модель для объяснения периодической переменности мазеров метанола II класса.
- 3) Впервые исследована переменность мазерного источника излучения одновременно в оптическом диапазоне и в радиолинии метанола на 6.7 ГГц. *Данный результат на защиту не выносится.*

Практическая значимость

Одним из основных источников неопределенности в значениях плотности потока излучения в линиях CH_3OH , предсказываемых на основе моделей протопланетных дисков вокруг звезд малой массы, является неопределенность в оценках обилия метанола. Неопределенность в обилии во многом связана с неопределенностью в скоростях химических реакций на поверхности пыли (см., например, Vasyunin et al. [20]). В результате расчетов переноса излучения CH_3OH в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца в данной работе показано, что интенсивности линий метанола в ЛТР приближении могут на два порядка величины отличаться от интенсивностей в не-ЛТР приближении. Такое отличие сопоставимо с неопределенностью в оценках обилия метанола в протопланетных дисках, предсказываемых современными химическими моделями. Таким образом, показано, что при расчетах переноса излучения CH_3OH в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца важно учитывать эффекты отклонения от ЛТР.

На основе расчетов переноса излучения CH_3OH в протопланетных дисках вокруг звезды типа DM Тельца были получены оценки времени, которое необходимо для обнаружения излучения метанола при наблюдениях на радиоинтерферометре ALMA. Данные оценки могут использоваться при планировании наблюдений ближайших протопланетных дисков в линиях метанола на ALMA.

В ходе расчетов переноса излучения в линиях метанола в протопланетном диске вокруг маломассивной звезды были применены различные схемы уровней метанола, включающие различное число энергетических вращательных уровней самого нижнего колебательного состояния. В частности, были рассмотрены схемы уровней, которые: не включают вращательные уровни возбужденных крутильных состояний, включают вращательные уровни первого и второго возбужденных крутильных состояний. Было получено, что учет уровней возбужденных крутильных состояний не влияет на оценки плотности потоков излучения в линиях метанола. Таким образом, показано, что для получения точной оценки плотности потока излучения в линиях CH_3OH в протопланетных дисках вокруг звезд типа DM Тельца при не-ЛТР расчетах достаточно использовать схему без уровней возбужденных крутильных состояний. Это позволяет существенно (в разы) уменьшить машинное время, необходимое для не-ЛТР расчетов переноса излучения по сравнению со случаями, когда применяются схемы уровней, включающие уровни возбужденных крутильных состояний.

Расчеты интенсивности мазерного излучения CH_3OH на основе модели аккреционного диска вокруг массивной молодой двойной системы важны для исследований механизмов мазерной переменности. Результаты этих расчетов могут быть использованы при интерпретации и планировании наблюдений периодических мазерных источников. В частности, в результате расчетов на основе модели, предложенной в данной работе для объяснения периодической переменности мазеров, можно предположить, что вариации интенсивности мазерного излучения со временем зависят от места формирования мазеров в диске. Вариации интенсивности мазерного излучения в различных переходах могут быть существенно различными. Эти предсказания возможно проверить при наблюдениях.

Достоверность результатов

Расчеты переноса излучения CH_3OH на основе физико-химической модели диска вокруг звезды типа DM Тельца выполнены методом Монте-Карло с использованием различных схем энергетических уровней метанола. Используемая физико-химическая модель диска была рассчитана с использованием одной из наиболее обширных сеток химических реакций, включающей реакции в газовой фазе и на поверхности пылинок (см. описание в работе Семенова и Вибе [21]). Сходимость расчетов методом Монте-Карло обеспечена большим числом фотонов, запускаемых в модель. При не-ЛТР расчетах переноса излучения использовались наиболее современные данные о скоростях столкновительных переходов метанола из работы Rabli & Flower [22]. Было показано, что учет возбужденных крутильных состояний метанола не влияет на результаты расчетов переноса излучения для диска вокруг звезды типа DM Тельца. Для моделирования наблюдений диска вокруг звезды типа DM Тельца и оценки времени, необходимого для обнаружения излучения CH_3OH , использовался программный пакет CASA (Common Astronomy Software Applications) [23], который разработан для планирования наблюдений и обработки результатов наблюдений на радиоинтерферометрах, в том числе, на ALMA.

Расчеты интенсивности мазерного излучения CH_3OH в модели аккреционного диска вокруг массивной двойной системы выполнены с использованием схемы уровней, которая была апробирована в работе Cragg et al. [24] для расчетов мазерного излучения в схожих физических условиях. Параметры диска соответствуют оценкам, полученным из наблюдений. Физические условия в диске

были рассчитаны с помощью программного кода CLOUDY (Ferland et al. [25]), предназначенного для точных расчетов ионизационного и теплового баланса в стационарном приближении.

При анализе данных мониторинга V645 Cyg в оптическом диапазоне использовались три звезды сравнения. Для оценки погрешности измерений оптического блеска V645 Cyg использовалась дисперсия разностей блеска звезд сравнения. При мониторинге V645 Cyg в радиолинии метанола на 6.7 ГГц регулярно проводилась калибровка по плотности потока излучения. *Данные мониторинга V645 Cyg на защиту не выносятся.*

Личный вклад автора в совместные работы

Основные результаты диссертации опубликованы в 2 статьях [A1,A2] в рецензируемом зарубежном журнале (MNRAS). Обе публикации [A1,A2], лежащие в основе настоящей работы, написаны в соавторстве, причем вклад диссертанта в работы [A1,A2] является определяющим.

Автор диссертации лично провел следующие работы:

- В работе [A1] автор выполнил расчеты переноса излучения в линиях метанола на основе предоставленной физико-химической модели протопланетного диска вокруг звезды типа DM Тельца, автор выполнил моделирование наблюдений диска на ALMA и написал основной текст работы.
- В работе [A2] автор выполнил модификацию программного кода CLOUDY, выполнил расчеты физических условий в аккреционном диске вокруг массивной двойной системы и на их основе выполнил расчеты переноса излучения в мазерных линиях метанола, написал основной текст работы.

Апробация результатов

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- 1) 43-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 03 – 07 февраля 2014 г., Екатеринбург.
- 2) Международная конференция «Star Formation Across Space and Time», 11 – 14 ноября 2014 г., Нордвайк, Нидерланды.

- 3) 44-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 02 – 06 февраля 2015 г., Екатеринбург.
- 4) 45-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 01 – 05 февраля 2016 г., Екатеринбург.

Глава 1

Не-ЛТР расчеты переноса излучения метанола в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца

1.1 Введение

Определяющая фаза формирования планетной системы происходит в протопланетных дисках, физические свойства и химический состав которых определяют структуру формирующейся планетной системы, в том числе первичных планетных атмосфер [3, 26, 27]. Одним из наиболее важных вопросов, связанных с процессом формирования планет, является понимание того, как в этих дисках протекают синтез, эволюция и разрушение органических (пребиотических) молекул, и того, какая доля этой органики может достигать поверхности планет.

Есть свидетельства, полученные в лаборатории и из астрономических наблюдений, о том, что образование сложных органических молекул (СОМ) начинается до начала формирования звезд уже в холодных ядрах молекулярных облаков, на поверхности пылинок, выступающей в качестве катализатора для подвижных радикалов и легких атомов [8, 9, 28]. Сформировавшиеся на поверх-

ности пылинок молекулы в конечном итоге могут быть возвращены в газовую фазу либо во время медленного разогрева окружающей среды после образования центральной звезды [29], либо за счет других механизмов десорбции, таких как нагрев космическими лучами или ультрафиолетовым излучением, или поверхностная рекомбинация [30, 31].

Прямым указанием на то, что в дисках, в которых формируются планеты, есть пребиотические молекулы является богатство различных органических соединений, в том числе аминокислот, найденных в углеродистых метеоритах и кометной пыли в нашей Солнечной системе [1–4]. Первое поколение органических соединений могло образоваться в теплых областях досолнечной туманности [32–35] путем, например, пиролиза углеводородов и полициклических ароматических углеводородов при высоких температурах или в результате воздействия рентгеновского/ультрафиолетового излучения на богатые водой льды, содержащие HCN или NH₃, углеводороды и CO или CO₂. Второе поколение более сложных органических могло быть образовано из более простого органического вещества первого поколения за счет химических процессов с участием воды внутри больших углеродистых астероидов [32, 34].

На данный момент в межзвездной среде обнаружено несколько типов органических молекул, в том числе спиртов (например, CH₃OH), простых эфиров (например, CH₃OCH₃), кислот (например, HCOOH) и т.д. (см. обзоры [35, 36], недавние результаты наблюдений могут быть найдены в работе [37] для окрестностей молодых звездных объектов, работе [38] для горячих молекулярных ядер, работе [39] для окрестностей областей HII, работе [40] для темных молекулярных облаков). Излучение нескольких простых органических молекул, таких как формальдегид (H₂CO), циклопропенилидин (с-C₃H₂), цианоацетилен (HC₃N) и метилцианид (CH₃CN) было обнаружено и пространственно разрешено на (суб-)миллиметровых интерферометрах в нескольких близлежащих протопланетных дисках [41–45]. При наблюдениях на космической обсерватории *Spitzer* во внутренних теплых областях протопланетных дисков были обнаружены инфракрасные линии органических молекул, таких как HCN и C₂H₂ [46–52].

Основной причиной, почему обнаружение излучения сложных многоатомных молекул в дисках может быть затруднено, является сочетание относительно низкого обилия в газовой фазе, большого числа уровней энергии в молекулах и ограниченной чувствительности наблюдательных инструментов. Однако, с окончанием строительства радиоинтерферометра ALMA, становятся возможны более глубокие поиски излучения во вращательных и вращательно-

колебательных переходах сложных органических молекул. Большое значение для проведения будущих поисков слабых линий сложных органических молекул в протопланетных дисках имеет моделирование химических процессов и переноса излучения в линиях в объектах типа Т Тельца и Ae/Be звезд Хербига.

Одна из последних попыток обнаружить эмиссионные линии молекулы CH_3OH в протопланетном диске была предпринята в работе van der Marel et al. [53]. В рамках ранней научной программы ALMA авторы работы [53] наблюдали диск вокруг Oph IRS 48 в полосе частот номер 9 (~ 680 ГГц) при конфигурации положений антенн ALMA, обеспечивающей относительно высокое пространственное разрешение. Они обнаружили и пространственно разрешили излучение в линии H_2CO 9(1,8)–8(1,7) на 674 ГГц, которое проявляется в виде кольцеобразной структуры с радиусом ~ 60 а.е. Обилие H_2CO относительно H_2 , полученное ими с помощью расчетов переноса излучения с учетом отклонений от ЛТР, составляет $\sim 10^{-8}$. Они не смогли обнаружить излучение CH_3OH и получили оценку отношения обилия $\text{H}_2\text{CO}/\text{CH}_3\text{OH} > 0.3$. Также в работе [53] были получены не-ЛТР оценки потоков излучения в линиях A- CH_3OH на основе физической модели модели диска вокруг Oph IRS 48 из работы [54]. Согласно данным оценкам, наиболее интенсивные линии CH_3OH , вероятность обнаружения которых с помощью ALMA наиболее высока, лежат в частотных полосах ALMA с номерами 7 (275–373 ГГц) и 9 (602–720 ГГц).

Walsh et al. [5] рассчитали химическую модель протопланетного диска вокруг звезды типа Т Тельца, используя химическую сетку с большим числом реакций, и обнаружили, что СОМ могут эффективно формироваться в средней плоскости диска на поверхности пылинок. При этом обилие СОМ на поверхности пылинок может достигать $\sim 10^{-6}$ – 10^{-4} относительно числа ядер водорода. Обилие СОМ в газовой фазе поддерживается за счет тепловой десорбции и достигает значений $\sim 10^{-12}$ – 10^{-7} . Согласно упрощенным ЛТР расчетам переноса излучения Walsh et al. [5], излучение в некоторых из эмиссионных линий CH_3OH может быть довольно легко обнаружено в близлежащих протопланетных дисках при наблюдениях на ALMA. Эти линии отличаются от линий, которые были отобраны в работе van der Marel et al. [53], и эти линии не наблюдались ранее. Walsh et al. [5] являются авторами кампании по обнаружению излучения метанола на ALMA в крупных близлежащих протопланетных дисках.

В этой главе представлены ламинарная и турбулентная стационарные физические модели диска вокруг звезды типа Т Тельца в сочетании с химической моделью, учитывающей большое число реакций, в том числе, реакций син-

теза СОМ на поверхности пылинок (см. разделы 1.2.1–1.2.3). На основе этих моделей диска и подробной схемы энергетических уровней CH_3OH , которая использовалась для моделирования мазеров (см. раздел 1.2.5), проводятся детальные не-ЛТР расчеты переноса излучения в линиях A - и E -метанола (раздел 1.2.6). Кроме того, в этой главе представлены оценки потоков излучения в (суб-)миллиметровых линиях метанола, и выбраны линии, вероятность обнаружения которых при наблюдениях ближайших крупных дисков на всех 50 антеннах радиоинтерферометра ALMA максимальна (раздел 1.3).

1.2 Модель

1.2.1 Физическая структура диска

В этой главе рассматривается 1+1D физическая модель диска, которая была рассчитана Семеновым и Вибе [21], далее SW11, на основе модели D’Alessio et al. [55]. Это α -модель протопланетного диска вокруг звезды типа Т Тельца, с параметрами соответствующими хорошо изученной системе DM Тельца. Температура газа и пыли предполагаются равными. Турбулентная вязкость ν рассчитывалась согласно (Шакура и Сюняев [56]):

$$\nu(r, z) = \alpha c_s(r, z) H(r), \quad (1.1)$$

где $H(r)$ – шкала высот в диске на расстоянии r от центра диска, $c_s(r, z)$ – локальная скорость звука, и α – безразмерный параметр, который, как правило, принимается равным ~ 0.001 – 0.1 [57–59]. SW11 использовали постоянное значение $\alpha = 0.01$, пренебрегая возможным наличием «мертвой зоны» в диске [60].

Центральная звезда имеет спектральный класс M0.5, эффективную температуру $T_{\text{eff}} = 3720$ K, массу $0.65 M_{\odot}$ и радиус $1.2 R_{\odot}$ [61, 62]. Распределение энергии ультрафиолетового излучения совпадает с межзвездным ультрафиолетовым излучением из работы [63], с интенсивностью на 100 а.е. равной $\chi_*(100) = 410$ [64]. Рентгеновская светимость звезды равна 10^{30} эрг с $^{-1}$.

Внутренний радиус диска 0.03 а.е., внешний радиус 800 а.е. Темп аккреции массы $\dot{M} = 4 \times 10^{-9} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, масса диска $M_{\text{disc}} = 0.066 M_{\odot}$. По данным инфракрасных наблюдений на телескопе *Spitzer*, представленным в работах [65–67], диск вокруг DM Тельца возрастом 5–7 млн лет имеет в центре свободную от пыли область размером 3–10 а.е. Исходя из этого, при расчете химической эволюции диска учитывалась только область диска с радиусом больше 10 а.е.

Считалось, что пылинки в диске сферические, имеют радиус 0.1 мкм и состоят из аморфного оливина. Плотность пылинки 3 г см^{-3} , отношение массы пыли к массе газа постоянно и равно $m_{d/g} = 0.01$. Поверхностная плотность свободных мест на поверхности пыли $N_s = 1.5 \times 10^{15} \text{ мест см}^{-2}$, а общее число свободных мест на каждой пылинке составляет $S = 1.885 \times 10^6$ [68].

1.2.2 Химическая модель диска

Химическая структура диска, на основе которой были получены представленные в данной главе результаты, была рассчитана SW11. Эти расчеты были выполнены с помощью программного кода ALCHEMIC. Описание этого кода и химической модели дано в работах Семенова и др. [69] и SW11, поэтому далее предоставлено только краткое описание химической модели. Сетка химических реакций основана на данных osu.2007 (Garrod et al. [29]) с обновленными на конец 2010 года скоростями реакций.

Для расчета фотоионизации и диссоциации ультрафиолетовым излучением использовалось приближение одномерного плоско-параллельного слоя. Интенсивности ультрафиолетового звездного излучения $\chi_*(r) = 410 (r \text{ а.е.}) / (100 \text{ а.е.})^2$ и межзвездного излучения из работы [63] уменьшаются в вертикальном направлении и в направлении от центральной звезды. Скорости фотореакций были взяты из работы [70]. Фотохимическое самоэкранирование H_2 , f_{shield} , рассчитывалось по формуле 37 из работы Draine & Bertoldi [71]:

$$f_{\text{shield}} = \frac{0.965}{(1 + x/b_5)^2} + \frac{0.035}{(1 + x)^{0.5}} \times \exp \left[-8.5 \times 10^{-4} (1 + x)^{0.5} \right], \quad (1.2)$$

где $x \equiv N_2 / 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ – лучевая концентрация H_2 , $b_5 \equiv b / 10^5 \text{ см/с}$ – полная ширина на половине максимума линий H_2 . Экранирование молекул CO пылью, H_2 и самоэкранирование рассчитывались на основе таблицы 11 из работы [72].

Скорость ионизации космическими лучами, ζ_{CR} , рассчитывалась по формуле 3 из работы Семенова и др. [73]:

$$\zeta_{\text{CR}} = \frac{1}{2} \zeta_0 \left[\exp \left(-\Sigma_1(z, r) / 10^2 \right) + \exp \left(-\Sigma_2(z, r) / 10^2 \right) \right], \quad (1.3)$$

где $\zeta_0 = 1.3 \times 10^{-17} \text{ с}^{-1}$ – стандартная скорость ионизации, $\Sigma_1(z, r)$, $\Sigma_2(z, r)$ – поверхностная плотность вещества диска, соответственно, над и под точкой диска, находящейся на высоте z над плоскостью диска, с цилиндрическим радиусом

r от центра диска. При расчетах учитывалась ионизация из-за распада короткоживущих радионуклидов, скорость распада $6.5 \times 10^{-19} \text{ с}^{-1}$ [74]. Ослабление звездного рентгеновского излучения моделировалось с помощью приближенных выражений, полученных на основе двумерного Монте-Карло моделирования в работах [75, 76].

Взаимодействие газа и пыли заключается в адсорбции нейтральных частиц и электронов на пылинки со 100 % вероятностью, десорбции льдов за счет тепловых процессов, космических лучей и ультрафиолетового излучения. Кроме того, учитывались диссоциативная рекомбинация и радиативная нейтрализация ионов на заряженных пылинках, ионизация пылинок. При расчетах предполагалось, что H_2 не может прилипать к пылинкам. Вероятность поверхностной хемосорбции молекул была равна 5 %. Квантовый выход фотодесорбции составлял 10^{-3} [77–80].

Расширенный список поверхностных реакций, энергии десорбции и список реакций фотодиссоциации льда были взяты из работы Garrod & Herbst [81]. Расчет выполнялся на основе стандартных кинетических уравнений без учета туннелирования H и H_2 . В целом, сетка химических реакций включает 7306 реакций, 657 молекул из 13 элементов. Начальный химический состав соответствует составу с низкой металличностью из работы Lee et al. [82] (см. таблицу 1.1).

1.2.3 Химическая модель с учетом турбулентности и обилие метанола

При расчетах химической структуры диска предполагалось, что пыль и газ хорошо перемешаны и диффундируют в вертикальном направлении. Коэффициент диффузии для газа и пыли одинаков и равен:

$$D_{\text{turb}}(r, z) = \nu(r, z)/Sc, \quad (1.4)$$

где Sc – число Шмидта, характеризующее эффективность турбулентного переноса вещества, рассматривается как свободный параметр модели. В этом исследовании были рассмотрены два крайних случая, а именно, «ламинарная» модель диска без вертикального турбулентного переноса с $D_{\text{turb}} = 0$ ($Sc = \infty$) и модель диска с «быстрым» турбулентным перемешиванием ($Sc = 1$, далее модель с турбулентным перемешиванием будет называться «турбулентная» модель). Эти приближения широко используются в других работах при исследо-

Таблица 1.1: Начальный химический состав, использовавшийся в работе SW11 для расчетов моделей химической эволюции диска, на основе которых в данной главе были выполнены расчеты переноса излучения метанола. Результат из [82], который использовался соавторами из работы [A1] для вычислений, представленных в работе SW11.

Элемент	Обилие по отношению к ядрам атома водорода
H ₂	0.499
H	2.00(−3)
He	9.75(−2)
C	7.86(−5)
N	2.47(−5)
O	1.80(−4)
S	9.14(−8)
Si	9.74(−9)
Na	2.25(−9)
Mg	1.09(−8)
Fe	2.74(−9)
P	2.16(−10)
Cl	1.00(−9)

Примечание. $a(b) = a \times 10^b$

ваниях химической структуры дисков (см., например, [83–86]). При расчетах предполагалось, что диффузия вещества через границы диска внутрь или наружу отсутствует.

Используя физическую и химическую модели, а также начальный химический состав диска, описанные выше, SW11 рассчитали зависимость химического обилия от времени на промежутке времени 5 млн лет. Полученное распределение обилия метанола в газовой фазе в диске вокруг звезды типа DM Тельца на момент времени 5 млн лет (рис. 1.1) было использовано для расчетов переноса излучения в линиях метанола, результаты которых представлены в данной главе.

Как видно на рис. 1.1, газофазный метанол в обеих «ламинарной» и «турбулентной» моделях диска распределен в основном выше средней плоскости диска, в областях, где кинетическая температура около 30–50 К. Турбулентное перемешивание повышает обилие метанола в газовой фазе и его поверхностную плотность более чем на порядок, в частности, во внешних областях диска. Это происходит из-за более эффективного формирования метанола на поверхности пылинок в «турбулентной» модели. В этой модели ледяные пылинки из холодной средней плоскости диска могут достигать более теплых областей в атмосфере диска с более интенсивным полем излучения, что способствует более интенсивному облучению богатых водой ледяных мантий и образованию в них активных радикалов и различных молекул, в том числе метанола, а также увеличению поверхностной подвижности этих радикалов и молекул. Более высокое обилие метанола на пылинках приводит к повышению концентрации метанола в газовой фазе за счет тепловой и нетепловой (фото-)десорбции. Стоит отметить, что область диска с высоким обилием метанола находится на различных высотах в двух моделях диска, что может значительно влиять на результаты моделирования переноса излучения в линиях (см. ниже).

В химической модели SW11 метанол рассматривался без учета деления на *A* и *E* разновидности, которые представляют различные конфигурации ядерных спиновых состояний метильной группы. При расчетах переноса излучения предполагалось, что обилие *A*- и *E*-метанола одинаково.

Характерная неопределенность поверхностной плотности молекул в диске, в том числе CH_3OH , предсказываемой современными химическими моделями диска, может достигать 3–5 порядков по величине и связана с неопределенностью в скоростях реакций, содержащихся в химических сетках (см., например, Васюнин и др. [20]). Для того чтобы оценить влияние этой неопределенности

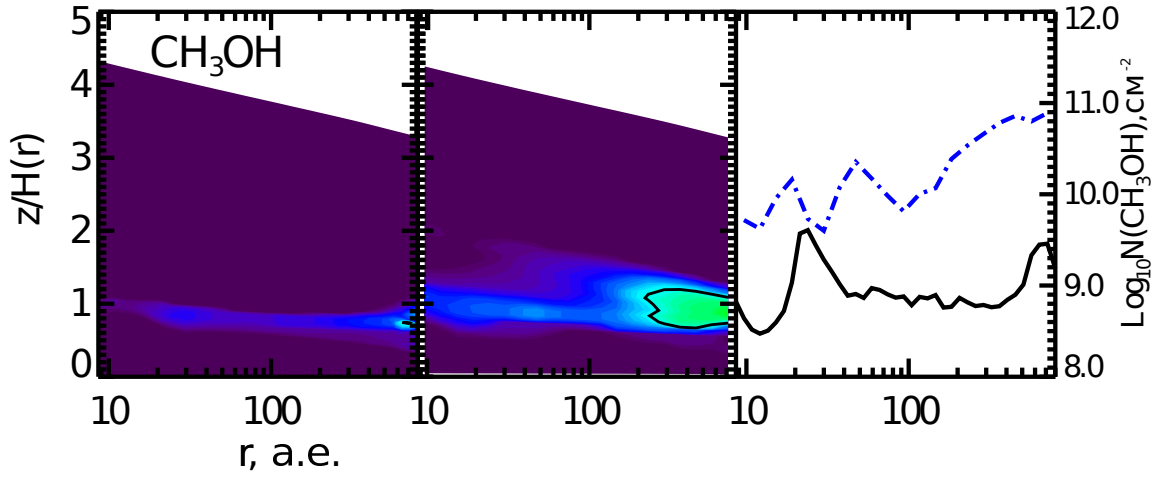


Рисунок 1.1: Обилие метанола по отношению к водороду (первые 2 панели) и поверхностная плотность (правая панель) газофазного метанола в модели диска вокруг звезды типа DM Тельца в момент времени 5 млн лет. Слева направо: 1 – «ламинарная» модель диска; 2 – «турбулентная» модель диска. Контурная линия обозначает обилие CH_3OH равное 10^{-12} . Сплошная линия на самой правой панели соответствует «ламинарной» модели диска, в то время как штрихпунктирная линия соответствует «турбулентной» модели. Результат соавторов работы [A1], представленный в работе SW11.

на модельную плотность потока излучения метанола, были выполнены тестовые расчеты переноса излучения для «ламинарной» модели диска с обилием метанола увеличенным вручную в 5 раз.

1.2.4 Структура диска, используемая для расчета переноса излучения

SW11 выполнили свои расчеты, используя двумерную нерегулярную пространственную сетку, состоящую из 41 точки по радиусу и 91 точки по высоте в цилиндрических координатах (r, z) . Расстояние между точками сетки вдоль вертикальной оси z меньше, когда значение r меньше. Например, при $r = 9.66$ а.е. сетка охватывает диапазон высот от 0.054 до 4.82 а.е., в то время как при $r = 800$ а.е. сетка охватывает высоты от 17.3 до 1536 а.е.

Для расчета переноса излучения в линиях, результаты которого представлены в данной главе, используется другая адаптивная 3D сетка (см. раздел 1.2.6) и применяется линейная интерполяция физических и химических параметров диска, рассчитанных SW11. Этими физическими и химическими параметрами были числовая плотность водорода n_{H_2} , плотность гелия n_{He} , кинетическая

Таблица 1.2: Минимальные и максимальные значения физических и химических параметров диска в моделях SW11. Результат соавторов работы [A1].

Модель диска	Параметр	Минимум	Максимум
«ламинарная» и «турбулентная»	T , K	12	114
«ламинарная» и «турбулентная»	n_{H_2} , cm^{-3}	1.63(−7)	1.26(11)
«ламинарная» и «турбулентная»	n_{He} , cm^{-3}	6.66(0)	2.45(10)
«ламинарная»	X_{M}	5.98(−31)	1.48(−12)
«турбулентная»	X_{M}	1.61(−32)	4.08(−11)

Примечание. $a(b) = a \times 10^b$

температура газа T и обилие метанола X_{M} (по отношению к числовой плотности H_2). Для расчета переноса излучения физические параметры в средней плоскости диска на $z = 0$ были приняты равными параметрам в точках сетки SW11 с наименьшей высотой. Диапазоны значений физических и химических параметров приведены в таблице 1.2.

1.2.5 Схема энергетических уровней метанола, вероятности радиативных и столкновительных переходов

В этой главе для расчета переноса излучения использовалась схема уровней метанола, представляющая подмножество более полного набора вращательных уровней и крутильных состояний метанола, описанного в работе Cragg et al. [24]. Схема, представленная в [24], ранее использовалась для расчетов населенности уровней метанола в условиях с кинетической температурой газа и пыли от 20 до 250 K, плотностью водорода от 10^4 до 10^9 cm^{-3} и удельной лучевой концентрацией от 10^{10} до $10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$. Таким образом, схема из работы [24] была апробирована для расчетов в диапазоне физических параметров, соответствующих условиям в моделях диска, рассматриваемых в этой главе.

Метод, используемый нами для того чтобы свести к минимуму количество уровней, сохраняя точность расчетов переноса излучения, был предложен в работе Sobolev & Deguchi [87]. Вкратце, в расчеты включаются все вращательные уровни метанола в основном крутильном состоянии с энергией, меньшей

предварительно выбранного порогового значения. Вращательные уровни возбужденных крутильных состояний включаются только в том случае, если они связаны с выбранными основными уровнями радиативными переходами. В данной работе были включены уровни основного крутильного состояния с энергией до 285 см^{-1} (или 400 K) и вращательными квантовыми числами J до 18. Далее по тексту схема, включающая только уровни основного крутильного состояния, будет обозначаться как схема $v_t = 0$. Эта схема включает в себя 190 и 187 уровней для A - и E - CH_3OH , соответственно.

Большая часть результатов, представленных в данной главе, была получена с помощью схемы $v_t = 0$, так как она включает в себя относительно небольшое число уровней. Расчеты с этой схемой требуют умеренных вычислительных мощностей с точки зрения оперативной памяти и процессорного времени. Также в данной работе были проведены расчеты с другой схемой уровней, которая включает вращательные уровни первых двух возбужденных крутильных состояний с крутильными квантовыми числами $v_t = 1$ и $v_t = 2$. Далее по тексту эта схема будет обозначаться как схема $v_t = 2$. Общее число уровней в схеме $v_t = 2$ 570 и 561 для A - и E -метанола, соответственно. Максимальная энергия уровня в схеме $v_t = 2$ примерно 850 см^{-1} или 1200 K.

Энергия уровней и вероятности радиативных переходов метанола, используемых в данной главе, были вычислены в работе Cragg et al. [24] на основе данных из работы Mekhtiev et al. [88]. Вероятности столкновительных переходов были взяты из работы Rabli & Flower [22] и совпадают с данными, которые представлены в базе Leiden Atomic and Molecular Database (LAMDA, [89]). Для расчетов, результаты которых представлены в данной главе, эти скорости столкновительных переходов были умножены на коэффициенты, соответствующие энергиям уровней, таким же образом, как это было сделано в работе Cragg et al. [24]. Скорости чисто вращательных столкновительных переходов, отсутствующих в данных Rabli & Flower [22], были получены методом экстраполяции, описанным в работе [24]. Скорости столкновительных переходов между уровнями разных крутильных состояний были постоянны и равны $5 \times 10^{-14}\text{ см}^3\text{ с}^{-1}$. В расчетах с помощью схемы $v_t = 0$ в данной главе рассматривались столкновения только с пара- H_2 , также как в данных из базы LAMDA. При расчетах со схемой $v_t = 2$ в качестве агентов столкновений рассматривались как пара- H_2 , так и гелий. Столкновения с орто- H_2 не учитывались, так как соответствующие данные не были в открытом доступе на момент, когда было выполнено большинство расчетов переноса излучения, результаты которых представлены в данной главе.

Таким образом, основными различиями между молекулярными данными для метанола из LAMDA и данными, которые используются нами для расчетов со схемой $v_t = 0$, являются значения коэффициентов Эйнштейна и поправка за энергию к скоростям столкновительных переходов. Чтобы проверить, насколько эти различия могут влиять на результаты расчетов переноса излучения, были проведены расчеты спектров CH_3OH с использованием данных из базы LAMDA, которые затем были сравнены со спектрами, полученными со схемой $v_t = 0$.

1.2.6 Не-ЛТР расчеты переноса излучения

Расчеты переноса излучения на основе физической и химической моделей диска проводились с помощью программного кода LIME (Line Modeling Engine) версии 1.41b (Brinch & Hogerheijde [90]). LIME является трехмерным не-ЛТР Монте-Карло кодом для расчетов переноса излучения в (суб-)миллиметром и дальнем инфракрасном диапазонах в спектральных линиях и континууме. LIME позволяет выполнять расчеты переноса излучения в точках пространства, положения которых рассчитываются случайно в расчетной области в виде сферы.

Чтобы создать трехмерную пространственную сетку LIME на основе $1+1/2\text{D}$ сетки, которая использовалась для расчетов модели диска и описана в разделе 1.2.4, предполагалась зеркальная симметрия диска относительно средней плоскости и азимутальная симметрии диска. Положения точек сетки LIME были получены с помощью алгоритма, схожего с тем, который представлен в работе Douglas et al. [91].

На первом шаге алгоритма расчета положения точек сетки LIME в сферической расчетной области радиусом 1600 а.е. (2 радиуса диска) случайным образом выбирается некоторая точка. Затем эта точка становится кандидатом для включения в сетку LIME. Если эта точка не находится в пределах диска, то она отбрасывается, и выбирается новая точка. Если точка находится в пределах диска, то в интервале $[0, 1]$ генерируется случайное число p , и в этой точке вычисляются плотность газа n_{H_2} и обилие метанола X_{M} . Точка включается в сетку LIME только тогда, когда $p < (n_{\text{H}_2}/n_{0\text{H}_2})^{0.3}$ и $p < (X_{\text{M}}/X_{0\text{M}})^{0.3}$, где $n_{0\text{H}_2}$ и $X_{0\text{M}}$ максимальные значения плотности H_2 и обилия метанола в диске соответственно (см. таблицу 1.2). После включения в сетку необходимого количества точек их пространственное распределение сглаживается. Для сгла-

живания использовался метод, описанный в работе Brinch & Hogerheijde [90] и модифицированный таким образом, что все точки сетки при сглаживании остаются в пределах границ модели диска.

Чтобы проследить фотоны, покидающие расчетную область, в LIME используется еще одна сетка точек, которые равномерно распределены по поверхности расчетной области. Далее по тексту эта сетка будет называться граничной сеткой. При расчете переноса излучения в данной главе использовалось 10000 точек сетки в пределах границ модели диска и 10000 точек в граничной сетке. Пример сетки, положения точек в которой были рассчитаны для «ламинарной» модели диска, представлен на рис. 1.2. Все результаты, представленные ниже для «ламинарной» модели, были получены с этой сеткой. Эта сетка сгущается в центральных областях диска с $r < 100$ а.е., где плотность водорода высока. В соответствии с пространственным распределением обилия CH_3OH , число точек сетки в средней плоскости диска на $r > 200$ а.е. меньше, чем в областях диска с $z > 100$ а.е.

Результаты расчетов с помощью LIME зависят от параметров, которые контролируют создание пространственной сетки, как, например, общее количество точек сетки и число точек в граничной сетке. За счет того, что положения точек генерируются случайно, синтетические спектры излучения, рассчитанные с помощью LIME для разных сеток, могут отличаться, даже если сами сетки сгенерированы с одними теми же параметрами. Это отличие можно отнести к дополнительной неопределенности в синтетических спектрах. В приложении А дана количественная оценка этой неопределенности, полученная при сравнении спектров метанола, вычисленных с различными сетками, положения точек в которых было сгенерировано с одними и теми же параметрами. Кроме того, чтобы проверить влияние выбора числа точек пространственной сетки LIME на результаты расчетов переноса излучения, были проведены расчеты переноса излучения с использованием сетки, включающей 20000 точек в пределах модели диска и 20000 точек на границе расчетной области (см. приложение А).

При расчетах переноса излучения предполагалось, что вещество диска вращается по закону Кеплера вокруг звезды с массой $0.65 M_{\odot}$. Также предполагалось, что скорость микротурбулентности в диске постоянна и соответствует ширине линии 0.1 км с^{-1} . Турбулентная составляющая ширины линии порядка 0.1 км с^{-1} близка к оценкам, которые получены из наблюдений протопланетных дисков (см., например, [27, 92, 93]).

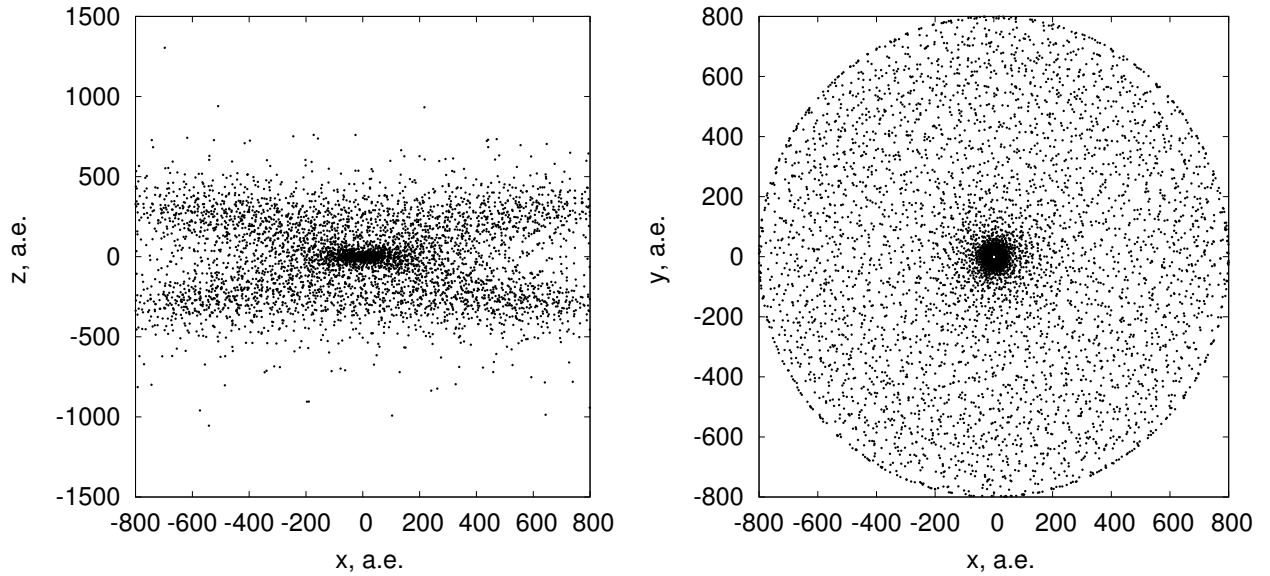


Рисунок 1.2: Положения точек пространственной сетки LIME в пределах диска, которые были рассчитаны для «ламинарной» модели диска. На левой панели диск виден с ребра. На правой панели диск виден «плашмя». Результат диссертанта из работы [A1].

Для расчетов, результаты которых представлены в данной главе, использовалась непрозрачность пыли, оценки которой были получены в работе Ossenkopf & Henning [94] для пылевых частиц с тонкими начальными ледяными мантиями и плотности окружающего пылинки газа равной 10^6 см^{-3} . Также были проведены тестовые расчеты с непрозрачностью для пылинок с тонкими начальными ледяными мантиями и плотности окружающего пылинки газа равной 10^8 см^{-3} . Эти тестовые расчеты показали, что синтетические спектры метанола не изменяются существенно при изменении непрозрачности пылинок.

Расчеты переноса излучения проводились независимо для *A*- и *E*-метанола так, будто это две различные молекулы. Для вычисления населенностей уровней метанола с помощью LIME использовалось 20 глобальных итераций и относительно большое число фотонов (более 10^6 фотонов). За счет этого уровень шума Монте-Карло в синтетических спектрах и населенностях относительно низок (см. также приложение A).

1.3 Результаты

Результатами расчетов переноса излучения являются синтетические спектры метанола и изображения диска в различных линиях метанола. Спектры были вычислены как сумма интенсивностей излучения во всех пикселях изоб-

ражения диска. Плотность потока в линиях получена путем вычитания из спектров излучения диска теплового излучения пыли в континууме. Спектры, представленные в данной главе, получены в предположении, что диск находится на расстоянии 140 пк и наклонен на 35° (0° соответствует случаю, когда диск виден «плашмя»). Расстояние и ориентация диска аналогичны таковым для диска вокруг DM Тельца (Andrews et al. [66]). Размер пикселя в синтетических изображениях диска составляет $0.01''$. Этот размер близок к размеру диаграммы направленности ALMA в наиболее расширенной конфигурации (6 угловых миллисекунд) на 675 ГГц. Все спектры, представленные в этой главе, были получены со спектральным разрешением равным 0.2 км с^{-1} .

В результате расчетов было обнаружено, что линия $A\text{-CH}_3\text{OH}$ на 290.111 ГГц является одной из наиболее сильных в синтетических спектрах, полученных со схемой уровней метанола $v_t = 0$ и «турбулентной» моделью диска. На синтетической карте излучения в этой линии в различных каналах можно видеть артефакты из-за относительно низкой плотности точек в пространственной сетке LIME во внешних областях диска (см. рис. 1.3). Излучение этих внешних областей диска дает наибольший вклад в неопределенность в синтетических спектрах. Для параметров сеток LIME, которые использовались в данной главе, эта неопределенность относительно велика и может достигать около 30 % от абсолютного значения потока излучения в линии. Однако величина этой неопределенности сопоставима или меньше возможной неопределенности, связанной с неопределенностью в скоростях химических реакций или скоростях молекулярных переходов.

1.3.1 Ламинарная химическая модель диска

В этом разделе представлены результаты расчетов переноса излучения с помощью LIME, полученные со схемой уровней метанола $v_t = 0$ и «ламинарной» химической моделью диска. В «ламинарной» модели диска очень низкое обилие метанола (см. рис. 1.1), таким образом, оценки потоков излучения в линиях метанола, полученные с помощью данной модели диска, являются пессимистичными с точки зрения поиска линий метанола в дисках на ALMA.

Уровень шума Монте-Карло в не-ЛТР спектрах, рассчитанных для «ламинарной» модели диска, равен примерно 0.01 мЯн. Неопределенность в абсолютных значениях плотностей потоков в линиях, связанная с параметрами пространственной сетки, составляет 0.2 мЯн (см. приложение А). Согласно не-

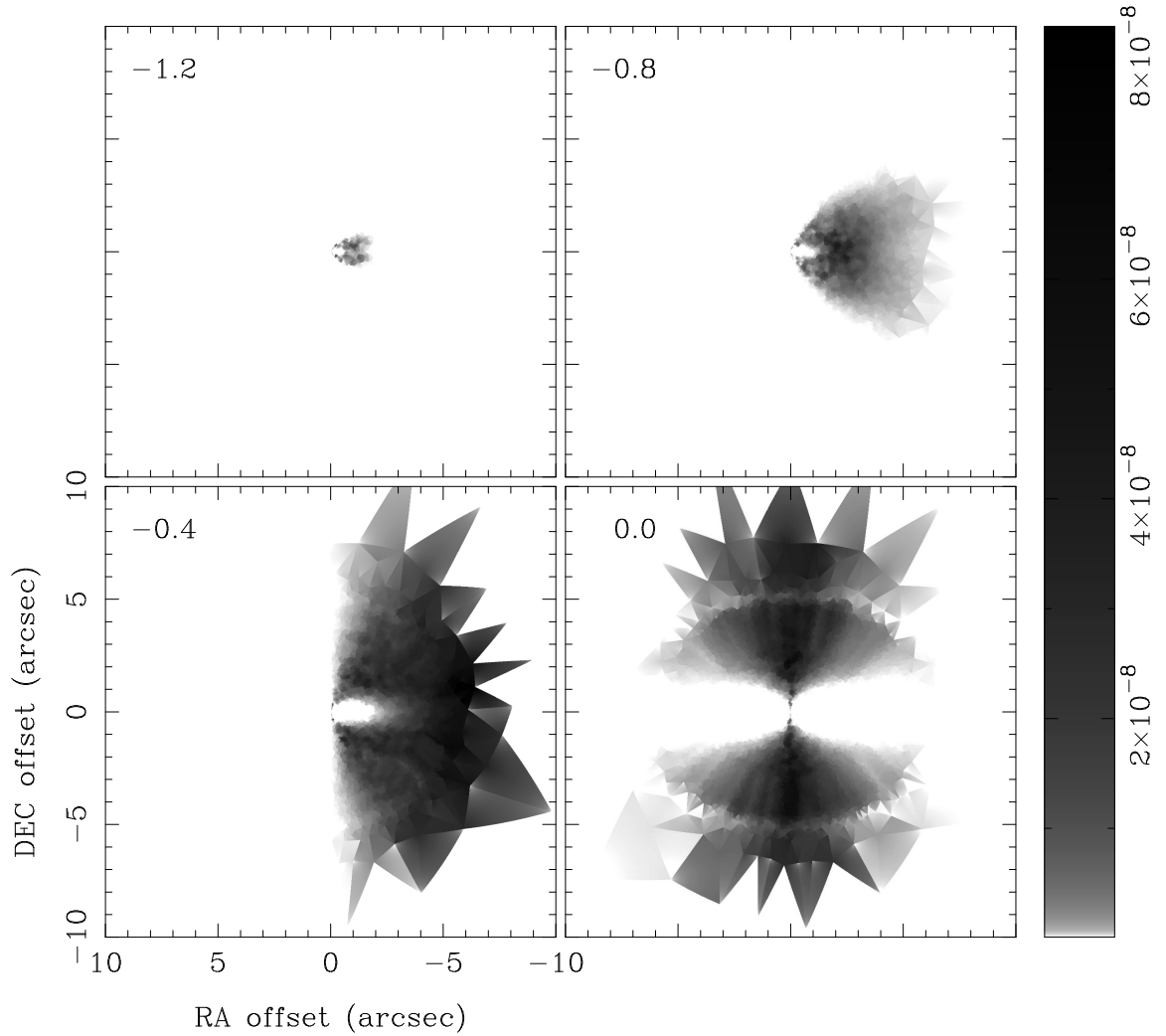


Рисунок 1.3: Карты излучения в линии $\text{CH}_3\text{OH } 6_0 - 5_0 A^+$ (290.111 ГГц) в различных спектральных каналах. Для расчетов использовалось распределение обилия метанола в «турбулентной» модели диска. Интенсивность излучения выражена в Ян/пиксель. В левом верхнем углу каждой панели показано смещение по скорости в км с^{-1} от центра линии на 290.111 ГГц. Результат диссертанта из работы [A1].

ЛТР расчетам, наиболее яркие линии принадлежат сериям переходов $J_1 \rightarrow J_0$ и $J_0 \rightarrow J_{-1}$ *A*-CH₃OH, и $J_{-1} \rightarrow J_{-2}$ *E*-CH₃OH.

На рис. 1.4 можно видеть, что и ЛТР и не-ЛТР плотности потоков в линиях метанола для «ламинарной» модели диска довольно малы и не превышают 4 мЯн. Если диск повернут «плашмя», то плотности потоков больше в 3.5 раза по сравнению с теми, которые показаны на рис. 1.4. Так или иначе, для любого наклона диска линии CH₃OH невозможно будет обнаружить при наблюдениях на всех антеннах ALMA, учитывая ошибку 0.2 мЯн в абсолютных значениях синтетических плотностей потоков в линиях.

Также нами были рассчитаны ЛТР и не-ЛТР спектры для «ламинарной» модели диска с обилием метанола увеличенным вручную в 5 раз. Плотность потока излучения в этих спектрах в 5 раз выше по сравнению со спектрами, представленными на рис. 1.4. Это означает, что плотность потока излучения в линиях растет линейно с увеличением обилия метанола, так как оптическая толщина в линиях очень мала и не превышает 0.05. Следовательно, неопределенность обилия, предсказываемого химическими моделями, линейно транслируется в неопределенность синтетических плотностей потоков.

Несмотря на то, что плотности потоков излучения в линиях, предсказанные для «ламинарной» модели диска, очень малы, эта модель диска используется далее, чтобы продемонстрировать разницу между ЛТР и не-ЛТР спектрами метанола. Также «ламинарная» модель используется, чтобы показать зависимость синтетических спектров метанола от используемых схемы молекулярных уровней метанола, скоростей радиативных и столкновительных переходов.

Важность эффектов отклонения от ЛТР

Чтобы показать важность эффектов отклонения от ЛТР при моделировании переноса излучения в линиях метанола, были сравнены ЛТР и не-ЛТР спектры, рассчитанные со схемой $v_t = 0$. Как можно видеть на рис. 1.4, не-ЛТР плотности потоков излучения в линиях в целом ниже, чем ЛТР плотности потоков. Многие линии, которые являются яркими в ЛТР спектре, относительно слабы в случае не-ЛТР. Наиболее интенсивные линии метанола в не-ЛТР спектре лежат в диапазоне частот от 200 до 600 ГГц, что соответствует полосам ALMA с номерами от 6 до 8. ЛТР спектры, рассчитанные в данной главе, хорошо согласуются со спектрами из работы Walsh et al. [5] (с точки зрения относительной плотности потока излучения в линиях).

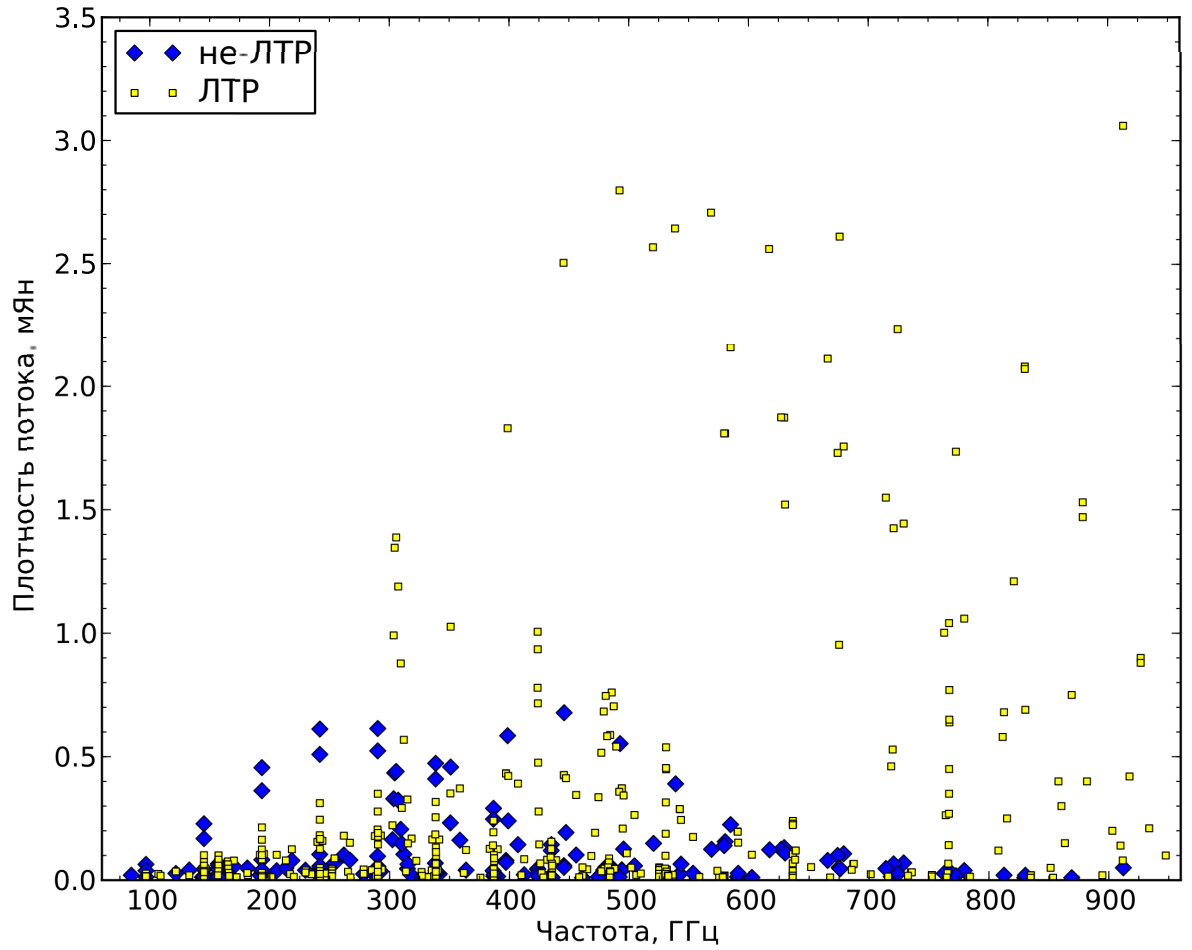


Рисунок 1.4: Пиковые ЛТР и не-ЛТР плотности потоков излучения в линиях метанола, рассчитанные для диска, который находится на расстоянии 140 пк и наклонен на 35° . Расчеты выполнены для «ламинарной» модели диска с использованием схемы уровней метанола $v_t = 0$. На рисунке показаны только линии с плотностями потоков > 0.01 мЯн. Результат диссертанта из работы [A1].

В некоторых переходах в рассматриваемых моделях диска происходит инверсия населенностей уровней метанола. Среди этих переходов наиболее интенсивные принадлежат сериям $J_2 \rightarrow J_1 E$ (самый интенсивный переход $5_2 - 4_1 E$), $J_{-1} \rightarrow J_0 E$ (самый интенсивный переход $7_{-1} - 6_0 E$), $J_3 \rightarrow J_2 A^+$ и A^- метанола (самые интенсивные переходы $3_3 - 3_2 A^+$ и A^-). Тем не менее, эта инверсия не приводит к значительному мазерному усилению и формированию интенсивного мазерного излучения. Оптическая толщина на луче зрения остается положительной во всех рассмотренных переходах метанола.

Влияние различий в молекулярных данных метанола

Отклонения от ЛТР в рассматриваемых в этой главе моделях диска значительны. В связи с этим, важным становится то, какие схема молекулярных уровней метанола и скорости переходов используются для расчетов переноса излучения в линиях. Чтобы оценить влияние уровней возбужденных крутильных состояний метанола и столкновений метанола с гелием, были сравнены спектры, вычисленные с использованием схем уровней метанола $v_t = 0$ и $v_t = 2$. Как видно из рис. 1.5, разность между спектрами, полученными со схемами $v_t = 0$ и $v_t = 2$, немного больше, чем уровень шума Монте-Карло 0.01 мЯн. Плотности потоков излучения в переходах схемы $v_t = 2$, которые отсутствуют в схеме $v_t = 0$, не превышают 0.02 мЯн. На нижней панели рис. 1.5 можно видеть, что при использовании схемы $v_t = 2$ высокочастотные линии становятся систематически более интенсивными по сравнению с низкочастотными линиями. Этот эффект не может быть связан с шумом Монте-Карло и параметрами пространственной сетки LIME, так как при расчетах как со схемой $v_t = 0$, так и со схемой $v_t = 2$, использовалась одна и та же сетка. Эффект увеличения интенсивности высокочастотных линий относительно мал и возникает в связи с учетом столкновений метанола с атомами гелия при расчетах со схемой $v_t = 2$.

Таким образом, схема уровней метанола и скорости столкновительных переходов аналогичные тем, которые даны в базе LAMDA, позволяют получить точные оценки плотностей потоков излучения в линиях метанола, по крайней мере, для рассматриваемых моделей диска. Учет столкновений метанола с гелием существенно влияет только на отношения линий, в частности, отношения линий, центральные частоты которых отличаются на более чем ~ 200 ГГц.

Как можно видеть на рисунке 1.6, разница между плотностями потоков излучения в линиях, полученных с данными из LAMDA и со схемой $v_t = 0$, не

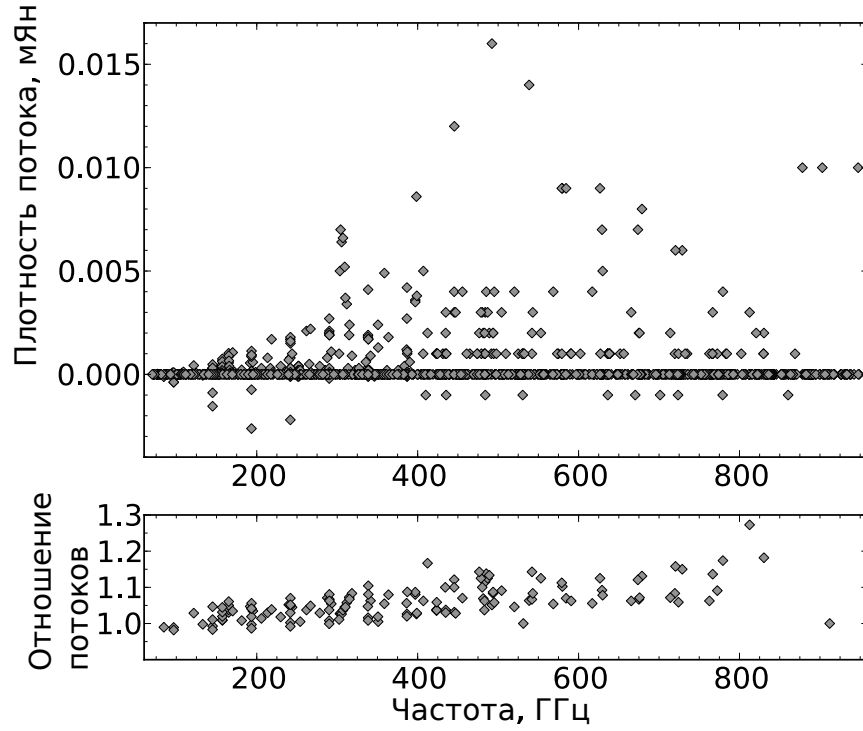


Рисунок 1.5: Разность (верхняя панель) и отношение (нижняя панель) между пиковыми значениями плотности потока, рассчитанными с использованием схем уровней метанола $v_t = 2$ и $v_t = 0$. Разность показана только для переходов, которые присутствуют в схеме $v_t = 0$. Отношение показано только для линий метанола с плотностью потока > 0.01 мЯн. Результат диссертанта из работы [A1].

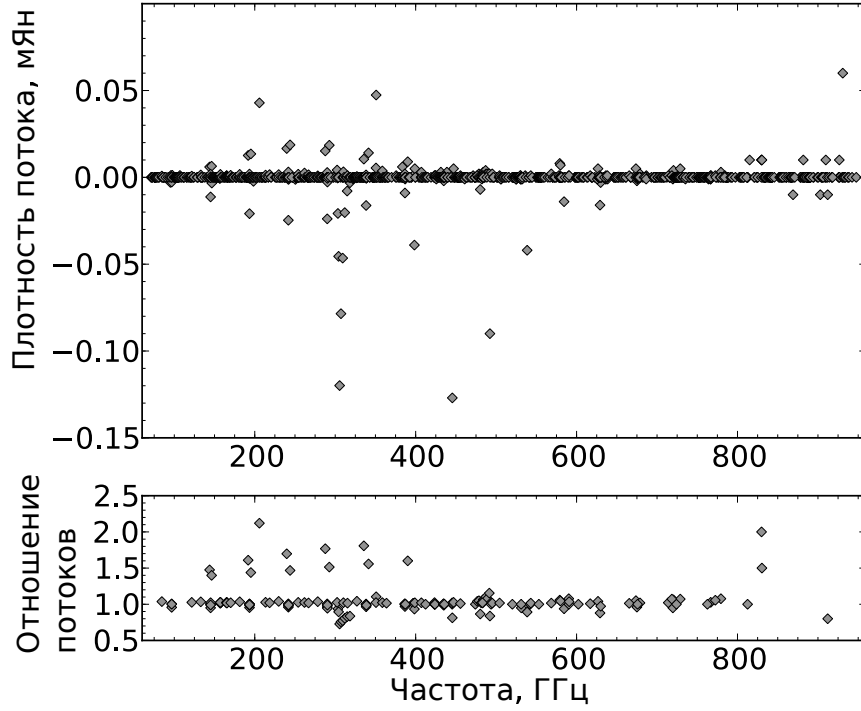


Рисунок 1.6: Разность (верхняя панель) и отношение (нижняя панель) между пиковыми значениями плотности потока излучения в линиях метанола, полученных с данными из базы LAMDA и полученных со схемой уровней метанола $v_t = 0$. Разность показана только для переходов, которые присутствуют в схеме $v_t = 0$. Отношение показано только для линий с пиковыми значениями плотности потока > 0.01 мЯн. По оси абсцисс отложены частоты линий, взятые из базы данных LAMDA. Нужно отметить, что частоты переходов, приведенные в LAMDA, отличаются от тех, которые использовались при расчетах со схемой $v_t = 0$. Результат диссертанта из работы [A1].

превышает уровень шума Монте-Карло 0.01 мЯн для большинства переходов метанола. Однако для ряда переходов разница в потоках, полученных для разных молекулярных данных, превышает 10 %. Такая разница связана с отличиями коэффициентов Эйнштейна A , которые даны в LAMDA, от тех, которые используются при расчетах на основе схемы $v_t = 0$. Коэффициенты Эйнштейна в базе LAMDA были рассчитаны на основе данных из базы JPL [95], в то время как в данной главе использовались коэффициенты Эйнштейна, полученные на основе данных из работы Mekhtiev et al. [88]. Коэффициенты Эйнштейна, используемые в данной главе при расчетах со схемами $v_t = 0$ и $v_t = 2$, почти идентичны тем, которые приведены в базе данных CDMS [96, 97]. Для некоторых переходов эти коэффициенты и коэффициенты из базы LAMDA отли-

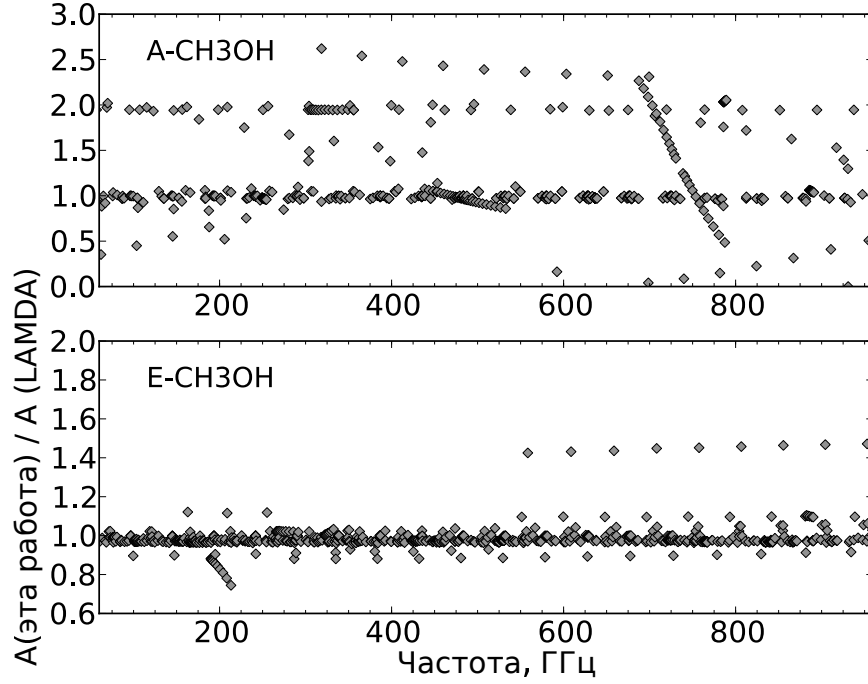


Рисунок 1.7: Отношение коэффициентов Эйнштейна, используемых в данном исследовании при расчетах со схемой уровней $v_t = 0$, и коэффициентов Эйнштейна, которые даны в базе LAMDA, для A - и E -метанола. Отношение показано только для переходов, которые присутствуют в схеме $v_t = 0$. Результат диссертанта из работы [A1].

чаются более чем в 2 раза (см. рис. 1.7). Такое большое отличие может быть связано с ошибками в молекулярных данных из JPL или из работы [88] (и, соответственно, из CDMS).

1.3.2 Турбулентная химическая модель диска

В этом разделе представлены результаты моделирования переноса излучения метанола с помощью LIME, полученные со схемой уровней метанола $v_t = 0$ для «турбулентной» химической модели диска. Обилие метанола в газовой фазе в «турбулентной» модели диска примерно на порядок выше, чем в «ламинарной» модели (см. рис. 1.1). Плотности потоков излучения в линиях метанола, предсказанные для «турбулентной» химической модели, могут рассматриваться как оптимистичные с точки зрения поиска излучения метанола в протопланетных дисках на ALMA.

Уровень шума Монте-Карло в синтетическом спектре, полученном для «турбулентной» модели диска, (рис. 1.8) около 0.02 мЯн (см. приложение А). Разли-

Таблица 1.3: Список 10 наиболее ярких линий CH_3OH , полученный в результате не-ЛТР расчетов переноса излучения для «турбулентной» модели диска с использованием схемы уровней метанола $v_t = 0$. Плотности потоков излучения в линиях были рассчитаны для диска, который находится на расстоянии 140 пк и наклонен на 35° . Линии, вероятность обнаружения которых при наблюдениях диска на ALMA наиболее высока, обозначены символом *. Результат диссертанта из работы [A1].

Частота, ГГц	Переход	Максимальная плотность потока мЯн	Интегральный поток, мЯн км с ⁻¹
290.111*	$6_0 - 5_0 A^+$	20.9	14.6
241.791*	$5_0 - 4_0 A^+$	18.2	14.4
445.571	$3_1 - 2_0 A^+$	17.1	14.0
290.070*	$6_{-1} - 5_{-1} E$	17.0	12.9
338.409*	$7_0 - 6_0 A^+$	16.8	13.3
241.767*	$5_{-1} - 4_{-1} E$	15.3	13.7
492.279	$4_1 - 3_0 A^+$	14.9	12.5
338.345	$7_{-1} - 6_{-1} E$	14.6	12.4
398.447	$2_1 - 1_0 A^+$	14.1	11.0
193.454	$4_0 - 3_0 A^+$	12.6	11.3

чие между ЛТР и не-ЛТР спектрами и различие спектров, рассчитанных для разных молекулярных данных метанола, аналогичны тем, которые были получены в случае «ламинарной» модели диска. В таблице 1.3 представлен список из 10 наиболее ярких линий CH_3OH , полученный в приближении не-ЛТР для «турбулентной» модели и схемы уровней метанола $v_t = 0$. Неопределенность в абсолютных значениях синтетических плотностей потоков излучения в табл. 1.3 может достигать 3 мЯн. Эта оценка неопределенности была получена сравнением спектров метанола, которые были рассчитаны с пространственной сеткой LIME, включающей 10000 точек, и с более плотной сеткой, включающей 20000 точек (см. приложение A).

Среди линий, перечисленных в таблице 1.3, только для линий $3_1 - 2_0 A^+$ (445.571 ГГц), $4_1 - 3_0 A^+$ (492.279 ГГц), $2_1 - 1_0 A^+$ (398.447 ГГц) интенсивность изменяется более чем на 40 % при изменении используемых коэффициентов Эйнштейна. Изменения интенсивности всех остальных линий в таблице 1.3 при

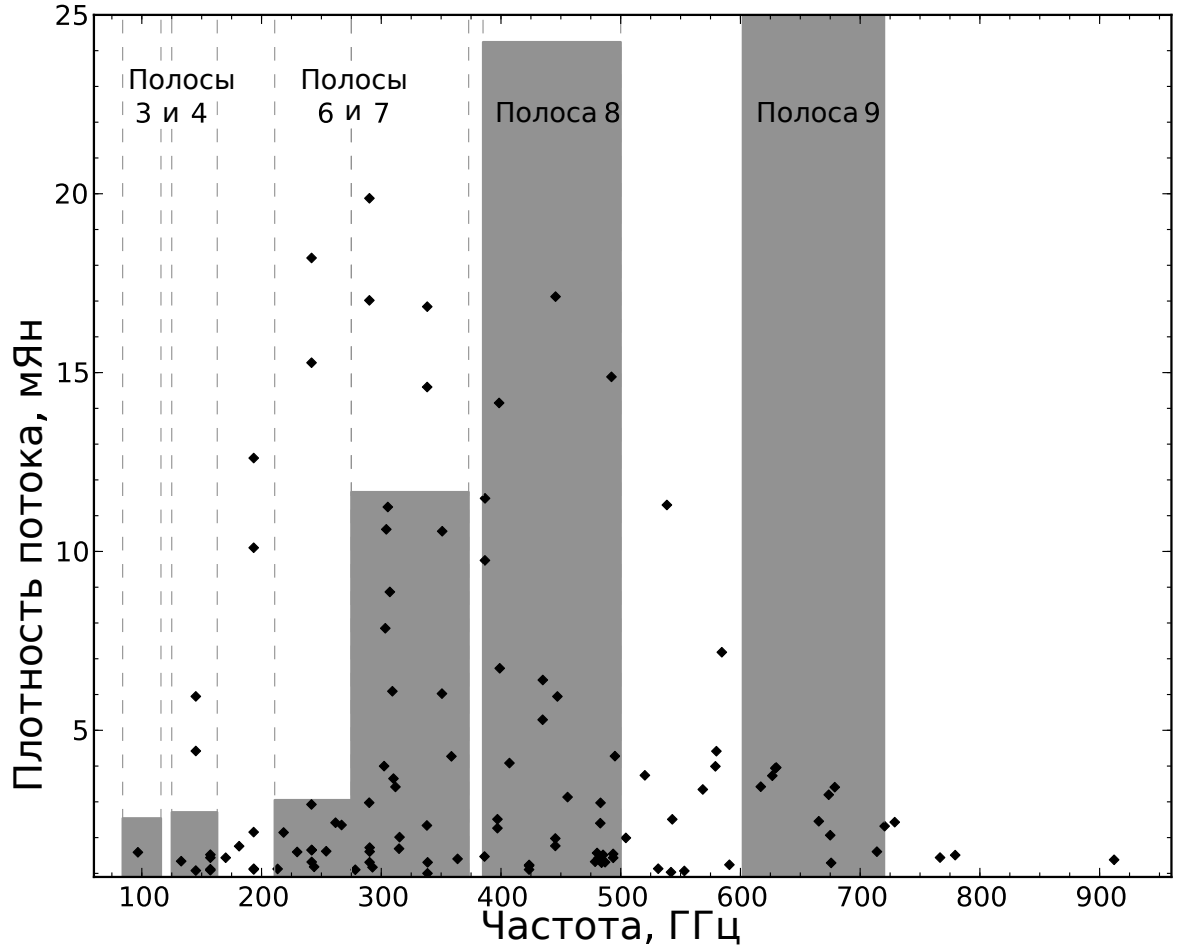


Рисунок 1.8: Пиковые не-ЛТР плотности потоков излучения в линиях метанола для диска, который находится на расстоянии 140 пк и наклонен на 35° . Плотности потоков были рассчитаны для «турбулентной» химической модели диска со схемой уровней метанола $v_t = 0$. На рисунке показаны только линии с пиковой плотностью потока > 1 мЯн. Вертикальные затененные прямоугольники показывают полосы ALMA с номерами 3, 4, 6, 7, 8, и 9. Высота этих прямоугольников соответствует чувствительности ALMA на соответствующей полосе при наблюдениях в течение 1 часа на всех 50 антеннах ALMA со спектральным разрешением 0.2 км с^{-1} . Результат диссертанта из работы [A1].

изменении коэффициентов Эйнштейна малы и не превышают уровень шума Монте-Карло 0.02 мЯн.

Плотности потоков излучения в линиях, полученные для «турбулентной» модели диска, больше в 30 раз по сравнению с теми, которые были получены для «ламинарной» модели диска. Это связано, главным образом, с более высокими обилием и лучевой концентрацией метанола в «турбулентной» модели. Кроме того, отношение интенсивностей сильных линий различны для этих двух химических моделей диска. Например, отношение линий $7_0 - 6_0 A^+$ (338.409 ГГц) и $5_0 - 4_0 A^+$ (241.791 ГГц) изменяется от 0.78 в «ламинарной» модели до 0.93 в «турбулентной» модели. Пространственные сетки LIME, которые использовались для расчетов переноса излучения для «ламинарной» и «турбулентной» моделей, включают одинаковое количество точек, но положения этих точек отличаются, что, однако, не может быть причиной отличий в отношениях интенсивностей ярких линий (см. приложение А).

Увеличение обилия CH_3OH также не может быть причиной отличий в отношениях интенсивностей линий в «ламинарной» и «турбулентной» моделях. Эти отличия в отношениях интенсивности линий связаны с различием в пространственном распределении газофазного метанола в «ламинарной» и «турбулентной» моделях диска. Как уже было отмечено в разделе 1.2.3, положение области диска с наиболее высоким обилием метанола, отличается в «ламинарной» и «турбулентной» моделях (см. рис. 1.1). Следовательно, линии излучения метанола в этих двух химических моделях в основном формируются в различных областях диска с различными физическими условиями.

Это означает, что наиболее яркие линии метанола и отношение их интенсивностей чувствительны к физическим условиям в диске. Кроме того, линии с частотой > 600 ГГц трассируют в основном внутренние области диска с $r < 400$ а.е., в то время как линии с частотой < 400 ГГц трассируют в основном внешние области диска с $r > 400$ а.е. (см., например, рис. 1.9).

Чтобы отобрать линии, вероятность обнаружения которых при наблюдениях на ALMA наиболее высока, пиковые плотности потоков излучения в линиях, полученные с помощью «турбулентной» модели, были сравнены с чувствительностью при наблюдениях на всех 50 антеннах ALMA в течение 1 часа со спектральным разрешением 0.2 км с^{-1} . Оценка чувствительности была получена с помощью ALMA Sensitivity Calculator для центральных частот в полосах ALMA с номерами 3, 4, 6, 7, 8 и 9 и показана на рис. 1.8. Нужно отметить, что рис. 1.8 представлен в основном для наглядности и может быть использован только для

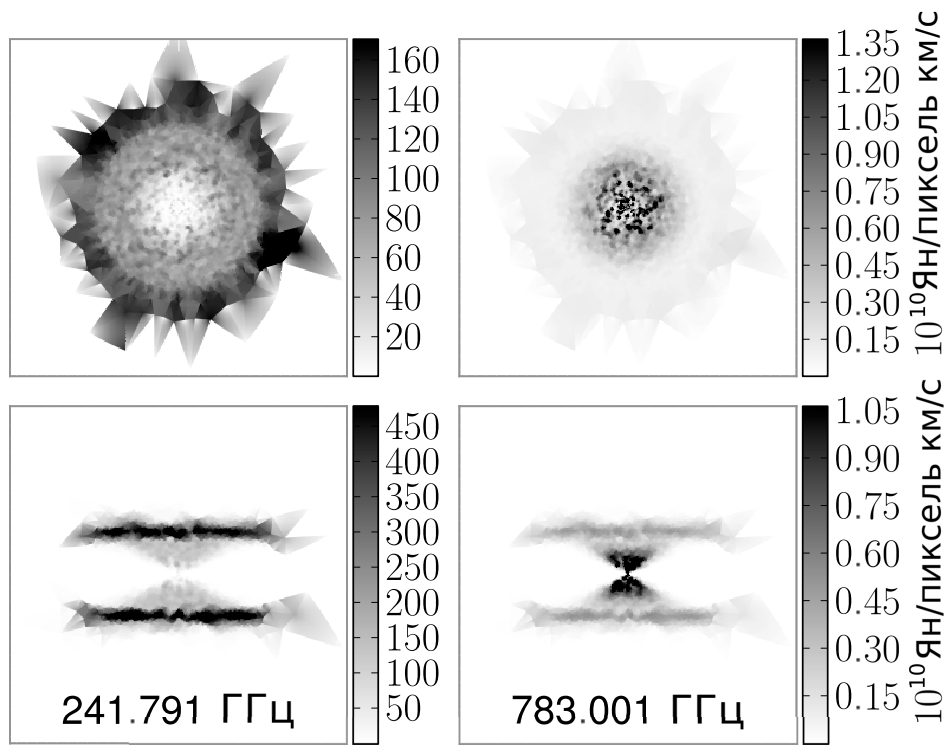


Рисунок 1.9: Синтетические карты излучения, проинтегрированного по скорости, для диска, который виден «плашмя» (верхние панели) и с ребра (нижние панели), в линиях метанола $5_0 - 4_0 A^+$ (241.791 ГГц, левые панели) и $3_0 - 2_0 A^+$ (783.001 ГГц, правые панели). Результат диссертанта из работы [A1].

грубой оценки времени интегрирования необходимого для обнаружения линий метанола при наблюдениях на ALMA. Для получения более точных оценок времени интегрирования при наблюдениях близлежащих крупных дисков необходимо принимать во внимание положение и размер диаграммы направленности телескопа.

Среди линий метанола, перечисленных в таблице 1.3, для линий $5_0 - 4_0 A^+$ (241.791 ГГц) и $5_{-1} - 4_{-1} E$ (241.767 ГГц) вероятность обнаружения при наблюдениях на ALMA наиболее высока. Другими линиями метанола, вероятность обнаружения которых относительно велика, являются линии $6_0 - 5_0 A^+$ (290.111 ГГц), $6_{-1} - 5_{-1} E$ (290.070 ГГц) и $7_0 - 6_0 A^+$ (338.409 ГГц).

Плотности потоков излучения в линиях, представленные в табл. 1.3, и спектр, показанный на рис. 1.8, были получены для угла наклона диска 35° . Нами также было исследовано то, как плотности потоков излучения изменяются с ориентацией диска. Вариации пиковой плотности потока из-за изменения угла наклона диска являются существенными. Например, пиковая плотность потока линии $5_0 - 4_0 A^+$ на 241.791 ГГц равна 63 мЯн и 10 мЯн для углов наклона равных 0° (диск виден «плашмя») и 90° (диск виден с ребра), соответственно.

Моделирование наблюдений на ALMA

Для оценки времени наблюдений, необходимого для обнаружения и картографирования излучения метанола, нами было выполнено моделирование наблюдений диска на ALMA. Моделирование наблюдений производилось с помощью процедур SIMOBSERVE и SIMANALYZE из программного пакета CASA версии 4.1.5. В качестве входных моделей для расчетов с помощью CASA использовались изображения диска в линии метанола $5_0 - 4_0 A^+$ (241.791 ГГц), полученные для «турбулентной» модели с пространственной сеткой LIME из 10000 точек. Моделирование наблюдений было выполнено для самой компактной конфигурации радиоинтерферометра ALMA, включающей все 50 антенн. Эта конфигурация была выбрана, чтобы обеспечить максимальную чувствительность наблюдений. Уровень водяного пара в атмосфере был равен 0.5 мм. Синтетические изображения диска с шумом, рассчитанные с SIMOBSERVE, были обработаны с помощью процедуры CLEAN с использованием естественных весов. Помимо отношения сигнала к шуму (SNR), для того чтобы охарактеризовать качество изображений, получаемых при синтетических наблюдениях,

использовались так называемые изображения fidelity [98]. Значение интенсивности в каждом пикселе изображения fidelity равно $|I|/|I - T|$, где I – интенсивность в изображении, полученном при синтетических наблюдениях, T – интенсивность в изображении, которое использовалось в качестве входного для симуляции наблюдений. Чем больше значения fidelity, тем лучше зашумленное изображение, полученное в результате синтетических наблюдений, соответствует идеальному модельному изображению, полученному с помощью LIME.

В результате получено, что из-за низкой поверхностной яркости изображение диска не может быть реконструировано даже после 9 часов наблюдений диска для любого угла наклона диска, находящегося на расстоянии 140 пк. Поскольку обнаружение линий метанола невозможно в случае диска вокруг DM Тельца, нами также были рассмотрены простые модификации синтетических изображений диска, которые могут повысить вероятность обнаружения линий CH_3OH при моделировании наблюдений. Учитывая относительно большую неопределенность в предсказываемых интенсивностях линий метанола, эти модификации могут быть хорошим первым приближением для изучения влияния расстояния до диска, размера диска и обилия метанола на результаты смоделированных наблюдений.

Поверхностная яркость диска была увеличена в 10 раз, что соответствует пределам возможной неопределенности обилия метанола вследствие неопределенности в скоростях химических реакций. В этом случае через 3 часа наблюдений можно увидеть некоторые признаки кольцеобразной эмиссии метанола для диска, который виден «плашмя» (см. рис. 1.10). Но в целом, обнаружение излучения метанола даже при увеличенной в 10 раз поверхностной яркости может быть очень затруднено особенно для диска с большими углами наклона. Можно пойти дальше и увеличить начальную поверхность диска яркость в 100 раз, что сравнимо с разностью вертикальной лучевой концентрации метанола в химических моделях SW11 и Walsh et al. [5]. В этом случае излучение CH_3OH может быть обнаружено с отношением сигнал-шум $(\text{SNR}) > 5\sigma$ и изображение диска может быть получено через 3 часа наблюдений для любого значения угла наклона диска.

Угловой размер диска вокруг DM Тельца велик по сравнению с размерами диаграммы направленности ALMA, что усложняет обнаружение линий метанола. Для моделирования наблюдений более компактного (~ 200 а.е.) диска, расположенного на расстоянии 140 пк, в исходном синтетическом изображении диска, полученном с помощью LIME, был уменьшен размер пикселя с 0.01 до

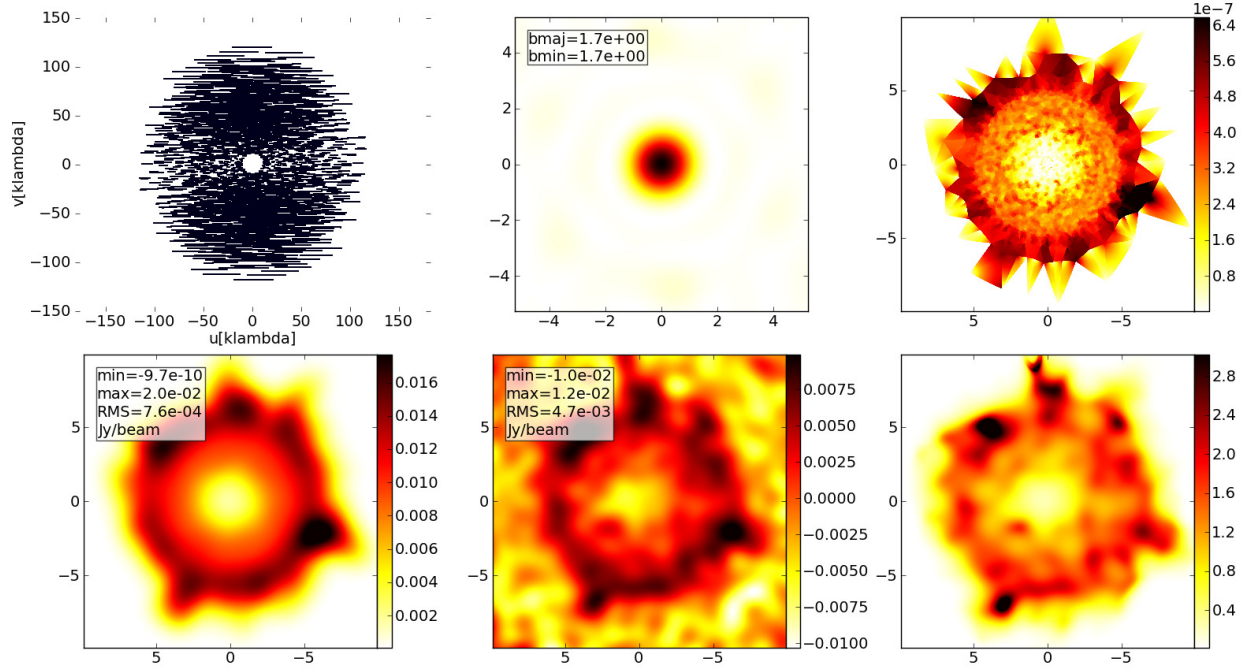


Рисунок 1.10: Результаты моделирования наблюдений диска в течение трех часов со всеми 50 антеннами радиоинтерферометра ALMA. Моделирование наблюдений выполнялось с помощью программного пакета CASA для диска, который ориентирован «плашмя» и находится на расстоянии 140 пк. Поверхностная яркость изображения диска, использовавшегося в качестве входного для процедур CASA, была увеличена в 10 раз по сравнению с изображением, которое было получено с помощью LIME для «турбулентной» модели диска. Слева направо и сверху вниз: uv -покрытие, синтезированная диаграмма направленности, входное изображение для процедур CASA, входное изображение, свернутое с диаграммой направленности, синтетическое изображение, полученное после процедуры CLEAN, fidelity. Оси, которые не подписаны, обозначают угловые секунды. Цветная шкала показывает интенсивность в Jy beam^{-1} на всех изображениях, кроме fidelity. Результат диссертанта из работы [A1].

0.0025". В этом случае наибольший размер диаграммы направленности ALMA сопоставим с угловым размером диска (см. рис. 1.11). Излучение CH_3OH может быть обнаружено с $\text{SNR} \sim 5\sigma$ и картировано (с относительно низким пространственным разрешением) после 3 часов наблюдений для диска ориентированного «плашмя». Для диска, который виден с ребра, SNR через 3 часа наблюдений составляет $\sim 3\sigma$.

Также был рассмотрен случай для диска с параметрами аналогичными таковым для диска вокруг TW Гидры, который находится ближе и имеет меньшие размеры по сравнению с диском вокруг DM Тельца. Диск вокруг TW Гидры находится на расстоянии 54 пк и его радиус и угол наклона равны ~ 200 а.е. и 6° , соответственно (Andrews et al. [99]). Для моделирования наблюдений подобного диска, поверхностная яркость синтетических изображений, полученных с помощью LIME, была умножена на коэффициент $(140/54)^2$, и размер пикселя был уменьшен с 0.01 до 0.0065". В результате получено, что излучение метанола может быть обнаружено с $\text{SNR} \sim 5\sigma$ и картировано через 3 часа наблюдений для любого наклона диска (см. рис. 1.12).

1.4 Обсуждение

Самая большая неопределенность при анализе возможности регистрации излучения метанола в протопланетных дисках на ALMA связана с неопределенностью химической структуры диска. Во-первых, как это было продемонстрировано в работе [20], отсутствие точных данных о скоростях химических реакций в газовой фазе приводит к относительной неопределенности в рассчитываемом обилии простых СОМ в дисках, таких как, например H_2CO и CH_3OH , которая достигает $> 3-5$. Вторым источником неопределенности является наше ограниченное знание химических процессов на поверхности пылинок, которые, как предполагается, являются главным путем синтеза органических молекул в космосе (см., например, [35, 81]). В работе SW11 были использованы скорости поверхностных реакций, такие же как в работах [29, 81], полученные на основе точных лабораторных измерений, включая измерения для основных реакций на поверхности пылинок, за счет которых образуется и разрушается метанол. Поскольку на данный момент не было ни одной попытки статистического анализа влияния неопределенности в поверхностных химических реакциях на результаты астрохимического моделирования, можно сделать только грубую оценку, что

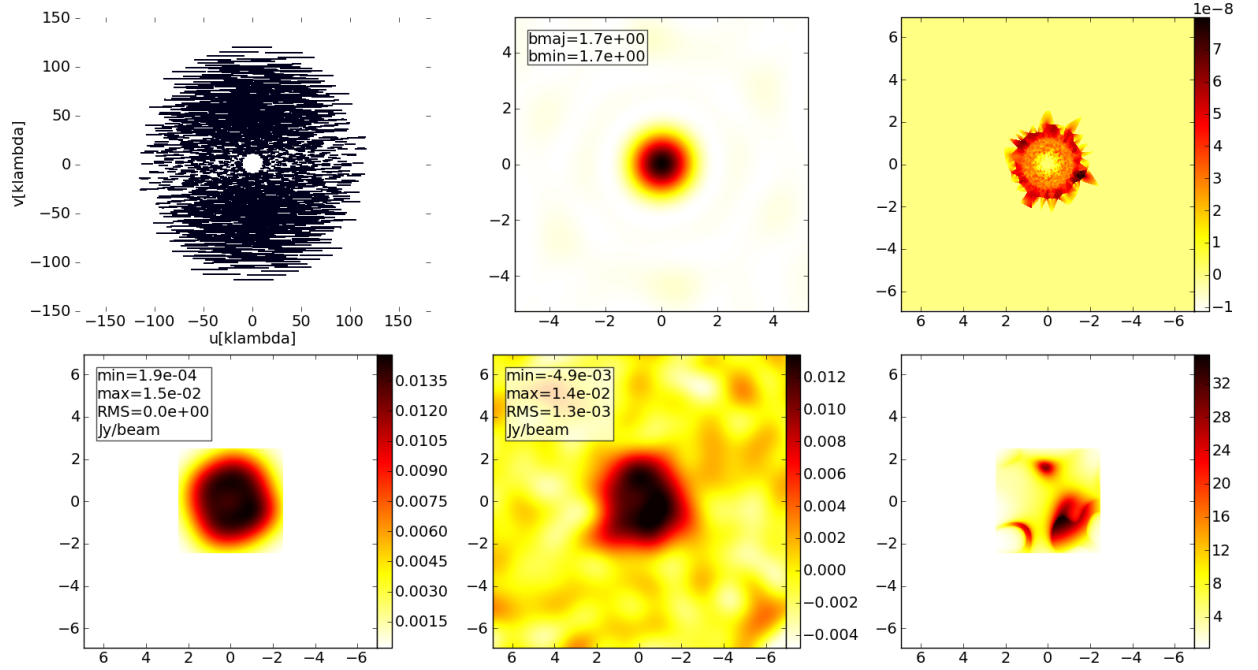


Рисунок 1.11: Результаты моделирования наблюдений диска в течение трех часов со всеми 50 антеннами радиоинтерферометра ALMA. Моделирование наблюдений выполнялось для диска, который ориентирован «плашмя» и находится на расстоянии 140 пк. Размер пикселя изображения диска, использовавшегося в качестве входного для процедур CASA, был уменьшен с 0.01 до 0.0025'' по сравнению с изображением, которое было получено с помощью LIME для «турбулентной» модели диска. Слева направо и сверху вниз: uv -покрытие, синтезированная диаграмма направленности, входное изображение для процедур CASA, входное изображение, свернутое с диаграммой направленности, синтетическое изображение, полученное после процедуры CLEAN, fidelity. Оси, которые не подписаны, обозначают угловые секунды. Цветная шкала показывает интенсивность в Jy beam^{-1} на всех изображениях, кроме fidelity. Результат диссертанта из работы [A1].

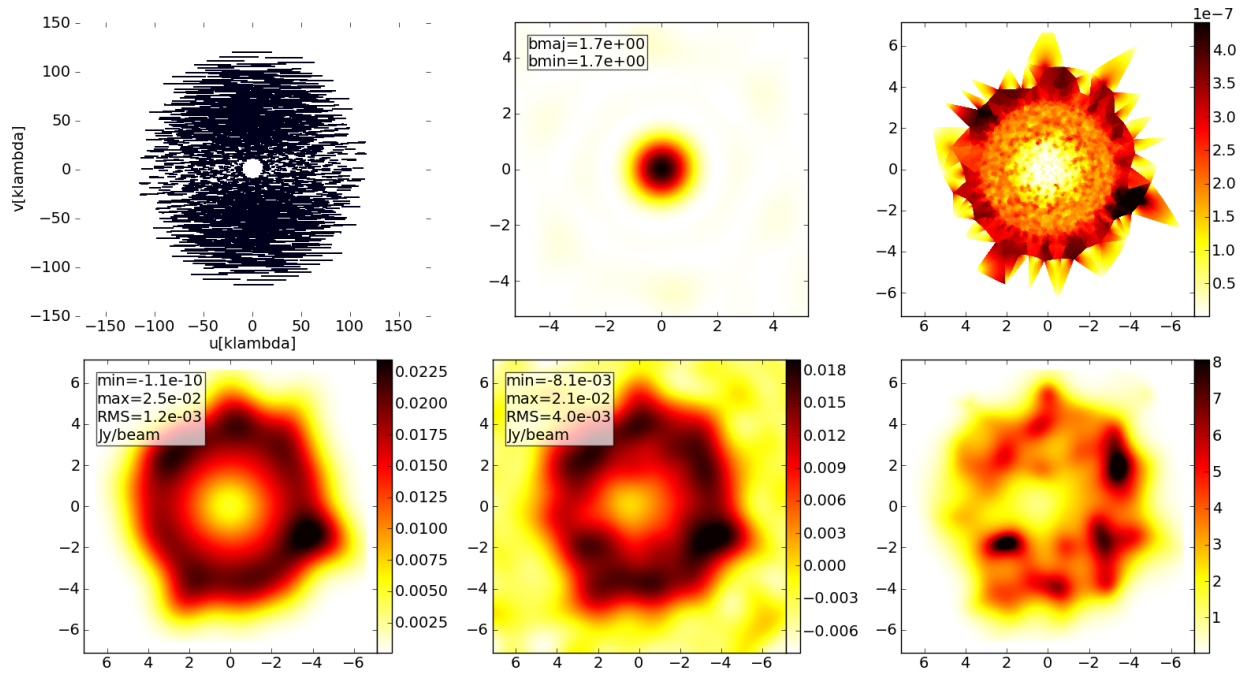


Рисунок 1.12: Результаты моделирования наблюдений диска, параметры которого соответствуют параметрам диска вокруг TW Гидры, в течение 3 часов со всеми 50 антеннами радиоинтерферометра ALMA. Слева направо и сверху вниз: uv -покрытие, синтезированная диаграмма направленности, входное изображение для процедур CASA, входное изображение, свернутое с диаграммой направленности, синтетическое изображение, полученное после процедуры CLEAN, fidelity. Оси, которые не подписаны, обозначают угловые секунды. Цветная шкала показывает интенсивность в Jy beam^{-1} на всех изображениях, кроме fidelity. Результат диссертанта из работы [A1].

общая относительная неопределенность обилия метанола, рассчитанного в рассматриваемой в данной главе модели диска SW11, составляет порядка $\sim 10\text{--}30$. Результаты расчетов обилия CH_3OH и других СОМ с помощью всех остальных астрохимических моделей дисков, включающих реакции в газовой фазе и на поверхности пылинок, должны иметь аналогичную неопределенность.

Еще одним важным фактором, который влияет на химическую структуру диска, является используемая физическая структура диска, например, распределения плотности и температуры, свойства пыли и т.д. Это существенно усложняет сравнение различных химических моделей диска даже в том случае, когда используемые сетки химических реакций одинаковы. В работе Walsh et al. [5] проведено детальное сравнение их результатов с результатами, полученными с помощью других современных моделей, которые имеют аналогичную химическую сложность, в том числе с «ламинарной» моделью SW11, рассматриваемой в данной главе. В работе [5] также сравниваются результаты моделирования с использованием двух различных сеток химических реакций, а именно, сеток на основе данных университета Огайо (OSU, [29]) и данных «RATE06» UDFA [100].

Walsh et al. [5] обнаружили, что поверхностная плотность метанола в «ламинарной» модели SW11 меньше в 1000 раз по сравнению с другими моделями, хотя поверхностная плотность других ключевых для химии молекул, таких как CO, H_2CO и цианополиинов находится в хорошем согласии с другими моделями диска. Это расхождение в поверхностной плотности метанола больше, чем неопределенность химической модели SW11. Вероятной причиной расхождения является более низкая скорость рекомбинации на поверхности пылинок, которая связана с малым коэффициентом диффузии поверхностных реагентов, рассчитанной SW11 для отношения энергии диффузии к энергии десорбции равного 0.77 (Ruffle & Herbst [101]). В отличие от SW11, в работах Walsh et al. [5] и Willacy et al. [102] диффузия поверхностных реагентов была рассчитана для отношения энергии диффузии к энергии десорбции равного 0.3.

Таким образом, результаты, полученные для «ламинарной» модели диска, представляют собой очень пессимистичный случай с точки зрения оценки вероятности обнаружения излучения протопланетных дисков в линиях метанола с помощью химических моделей с ограниченной диффузией молекул на поверхности пылинок. Не удивительно, что согласно трехмерным расчетам переноса излучения для «ламинарной» модели диска, линии метанола не могут быть

обнаружены при наблюдениях на всех антеннах ALMA в течение разумного периода времени ($\sim 2\text{--}3$ часа наблюдений для каждого источника).

С другой стороны, поверхностная плотность метанола в «турбулентной» модели диска выше примерно на два порядка величины по сравнению с «ламинарной» моделью. Как было отмечено в разделе 1.2.3, это связано с диффузией льдов из средней плоскости диска в области диска на больших высотах, где фотохимические реакции с участием льдов и в самих льдах более активны, и где более высокая температура способствует более активному синтезу сложных молекул на поверхности пылинок (см. дискуссию в работе SW11).

Поверхностная плотность CH_3OH в «турбулентной» модели по-прежнему ниже на порядок по сравнению с другими химическими моделями, но эта разница находится в пределах неопределенности обилия метанола, предсказываемого современными химическими моделями. Таким образом, результаты расчетов переноса излучения для «турбулентной» модели представляют собой оптимистичный случай с точки зрения обнаружения линий метанола в дисках. Согласно этим результатам, при наблюдениях на ALMA могут быть обнаружены несколько линий метанола (см. табл. 1.3). Нами получено, что излучение в следующих двух линиях метанола $5_0 - 4_0 A^+$ (241.791 ГГц) и $5_{-1} - 4_{-1} E$ (241.767 ГГц) может быть обнаружено с $\text{SNR} \sim 5\sigma$ в течение ~ 3 часов наблюдений на всех 50 антеннах ALMA.

Нужно обратить внимание, что эти две линии отличаются от тех, которые были выбраны в результате ЛТР расчетов в работе Walsh et al. [5]. Их лучшими кандидатами для обнаружения являются линии $3_1 - 3_0 A^{-+}$ (305.474 ГГц), $2_1 - 1_0 A^+$ (398.447 ГГц) и $5_{-2} - 4_{-1} E$ (665.442 ГГц). Согласно не-ЛТР расчетам переноса излучения, результаты которых представлены в данной главе, эти линии метанола не могут быть обнаружены в ближайших крупных дисках, которые ориентированы почти «плашмя», даже при наблюдениях на всех антеннах ALMA в течение двух часов. Это может объяснить, почему Walsh et al. были не в состоянии обнаружить эти линии в нескольких ярких дисках при наблюдениях на ALMA в рамках второго цикла ранней научной программы ALMA.

Также Walsh et al. [5] получили оценки плотности потока излучения в линиях, которые были выбраны нами в качестве кандидатов для наблюдений на ALMA с целью обнаружения. Walsh et al. оценили интегральную плотность потока линий $5_0 - 4_0 A^+$ (241.79 ГГц) и $7_0 - 6_0 A^+$ (338.409 ГГц) равную 71 и

31 мЯн км с⁻¹, соответственно. Эти значения значительно выше тех, которые получены нами при расчетах переноса излучения.

1.5 Заключение

В данной главе представлены результаты не-ЛТР расчетов переноса излучения в модели протопланетного диска вокруг звезды типа Т Тельца и получены оценки плотности потока излучения в линиях метанола в (суб-)миллиметровом диапазоне доступном для наблюдений на ALMA. Используемая для расчетов химическая модель диска имеет довольно низкую поверхностную плотность метанола по сравнению с другими современными химическими моделями диска. Таким образом, полученные в результате расчетов переноса излучения оценки потоков излучения являются пессимистичными с точки зрения поиска линий метанола в дисках с помощью ALMA. Были получены следующие основные результаты:

- ЛТР и не-ЛТР плотности потоков излучения в линиях метанола значительно отличаются;
- Высокочастотные линии метанола (> 600 ГГц) трассируют в основном внутренние области диска, а низкочастотные линии (< 400 ГГц) трассируют в основном внешние области диска;
- Отношение сильных линий метанола чувствительно к физическим условиям в диске;
- Лучшими кандидатами для обнаружения на ALMA являются линии метанола $5_0 - 4_0 A^+$ (241.791 ГГц) и $5_{-1} - 4_{-1} E$ (241.767 ГГц). Эти линии могут быть обнаружены с SNR 5σ в течение около 3 часов наблюдений на всех 50 антеннах ALMA крупных близлежащих дисков, расположенных на расстояниях $\lesssim 140$ пк;
- Другими хорошими кандидатами для наблюдений на ALMA являются линии $6_0 - 5_0 A^+$ (290.111 ГГц), $6_{-1} - 5_{-1} E$ (290.070 ГГц) и $7_0 - 6_0 A^+$ (338.409 ГГц);
- Схема уровней энергии и переходов метанола, аналогичная той, что дана в базе данных LAMDA (без вращательных уровней возбужденных крутильных состояний и без учета столкновений метанола с гелием), позволяет получить достоверные оценки плотностей потоков излучения в линиях метанола в протопланетных дисках вокруг звезд малой массы;
- Учет столкновений молекул метанола с атомами гелия может повлиять на

предсказываемые отношения интенсивностей линий метанола, особенно тех линий, разница центральных частот которых превышает ~ 200 ГГц;

- В рассмотренных моделях протопланетного диска вокруг звезды типа Т Тельца нет ярких мазеров метанола.

Глава 2

Мазеры метанола II класса в дисках вокруг массивных звезд: периодическая переменность мазеров

2.1 Введение

Мазеры метанола II класса наблюдаются в основном в направлении областей звездообразования (Caswell [103]). Есть несколько гипотез о том, где именно образуются мазеры метанола II класса. Первые мазерные источники этого типа были найдены в направлении ультра-компактных областей ионизованного водорода [104]. Для некоторых мазерных источников ассоциация с ультра-компактными областями НII была подтверждена радиоинтерферометрическими наблюдениями (см., например, [105, 106]). Действительно, мазеры метанола II класса могут возбуждаться излучением очень молодых областей ионизованного водорода с высокой мерой эмиссии [107, 108]. Другая гипотеза о связи мазеров метанола II класса с аккреционными дисками была предложена в работе Norris et al. [12] и подтверждается данными интерферометрических наблюдений (например, [109, 110]). Эти две гипотезы не противоречат друг другу, потому что испарение аккреционных дисков вокруг массивных звезд за счет интенсивного звездного излучения может приводить к образованию молодых ультра-компактных областей НII [111]. В случае формирования мазеров в диске накачка мазеров существенно зависит от излучения

пыли. Излучение пыли может приводить к формированию ярких мазеров (Соболев и др. [112], Воронков и др. [113]). Согласно еще одной гипотезе, мазеры метанола II класса образуются в истечениях из молодых звездных объектов (например, [114]). Накачка мазеров в истечениях может происходить также за счет излучения нагретой пыли. Часто при наблюдениях только мазерных линий [115, 116] или совместных наблюдениях мазерных и тепловых линий (например, [117]) бывает сложно сделать заключение о том, образуются ли мазеры метанола в диске или в истечении. Это связано с тем, что истечение формируется вблизи поверхности диска.

Некоторые из источников мазерного излучения метанола II класса, связанные с областями образования массивных звезд, демонстрируют периодическую переменность. В основе переменности такого рода может быть несколько различных механизмов (см, например, Goedhart et al. [14]). Наиболее вероятно, что эти механизмы имеют радиационную природу (Goedhart et al. [118]).

Один из таких механизмов предложен в работе van der Walt [15] и связывает переменность мазеров с изменениями фонового излучения. Изменения самого фонового излучения при этом объясняются переменностью сталкивающихся звездных ветров в массивных двойных системах.

Другой возможный механизм связан с вариациями инфракрасного излучения пыли, которое, как считается, накачивает мазеры метанола II класса (Sobolev & Deguchi [87]). Как было показано в работе Cragg et al. [24], яркостная температура мазеров метанола II класса может быть очень чувствительна к изменениям температуры пыли T_d , которая является источником накачивающего инфракрасного излучения.

Inayoshi et al. [17] предположили, что изменение температуры пыли может быть вызвано пульсациями массивной протозвезды, формирующейся при высоких темпах аккреции. В работе Araya et al. [16] изменения T_d объясняются вариациями темпа аккреции вещества диска на молодую двойную систему. Goedhart et al. [119] также утверждают, что параметры периодических мазерных вспышек можно объяснить двойственностью звезды, ассоциирующейся с переменными мазерами.

На данный момент нет прямых доказательств, что мазеры метанола II класса с подтвержденной периодической переменностью формируются в аккреционном диске. Тем не менее, число наблюдений, указывающих на то, что мазеры образуются в диске, увеличивается. Например, периодические вариации мазерного излучения были недавно обнаружены в источнике Цефей А (Szymczak et

al. [120]). Мазеры метанола II класса в этом источнике, скорее всего, находятся в структуре в виде кольца. Само кольцо перпендикулярно истечению, которое ассоциируется с источником в радио континууме HW2 [121].

В этой главе будет рассмотрена возможность объяснить периодическую переменность мазеров метанола в модели с мазерами, формирующимися в аккреционном диске, центральная часть которого содержит двойную систему и вращающиеся спиральные ударные волны. Структура аккреционного диска вокруг маломассивной двойной звезды была изучена, например, в работах Ochi et al. [122], Сытова и др. [123], Gómez de Castro et al. [124]. При расчетах, представленных в данной главе, предполагается, что подобная структура диска возможна в случае двойной системы с массивными компонентами (см., например, Krumholz et al. [125]).

В центральной области рассматриваемой структуры аккреционного диска находятся двойная система, очень горячий газ низкой плотности и вращающиеся спиральные ударные волны, которые формируются за счет сверхзвукового движения компонентов двойной системы. Вращение ударных волн приводит к периодическим изменениям излучения в тех областях диска, которые освещаются веществом за ударной волной. Это, в свою очередь, приводит к вариациям температуры в этих областях диска. В данной главе представлены полученные с помощью простой модели диска оценки того, как яркость мазеров метанола II класса в аккреционных дисках может зависеть от излучения вещества за ударной волны.

2.2 Модель диска

2.2.1 Общее описание

В данной главе рассматривается случай, когда мазеры метанола II класса образуются в аккреционном диске вокруг двойной протозвезды, содержащей массивный компонент и компонент промежуточной массы. В центре диска есть область, образованная за счет вращения спиральных ударных волн, которая относительно свободна от вещества диска. Предполагается, что газ в аккреционном диске находится в тепловом и ионизационном равновесии.

Яркость и спектр излучения в некотором радиальном направлении от центра диска подвержены изменениям вследствие вращения спиральной ударной волны. Вещество за ударной волной горячее, плотное и интенсивно излучает в

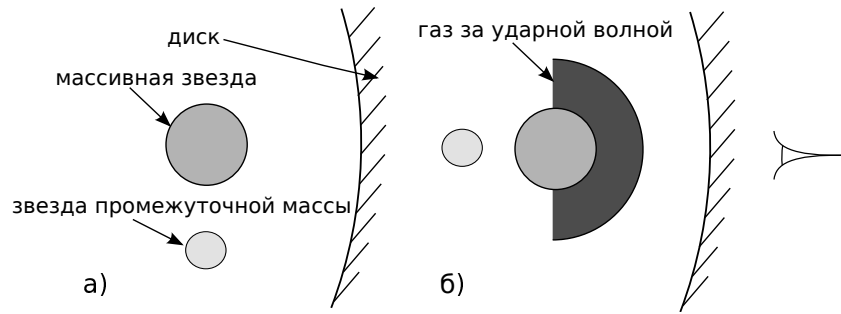


Рисунок 2.1: Схематический вид двух моделей: а) в момент после покрытия массивного компонента веществом за ударной волной; б) в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной. Разница в положениях компонент двойной относительно внутренней границы диска показана только для наглядности и не учитывается при расчетах. Совместный результат диссертанта из работы [A2].

ультрафиолетовом и оптическом диапазонах в зависимости от скорости ударной волны. Максимумы плотности и температуры вещества за ударной волной достигаются в основании ударной волны, то есть области, наиболее близкой к поверхности массивного компонента двойной протозвезды. Значение лучевой концентрации газа, N_{gas} , которое вычисляется вдоль линии между центром и внешней границей диска (за исключением звездного вещества), достигает своего максимума, когда основание ударной волны пересекает эту линию (Сытов и др. [126]). Интенсивность излучения, падающего на внутреннюю границу аккреционного диска, максимальна, когда эта граница подсвечивается веществом из области основания ударной волны, что соответствует моменту покрытия массивного компонента веществом за ударной волной.

Вращение спиральной ударной волны в центре диска вызывает соответствующие изменения T_d в диске. Эти изменения T_d влияют на накачку мазеров метанола и, таким образом, приводят к переменности мазерного излучения.

Чтобы оценить яркость мазеров в аккреционном диске в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной, и в условиях после покрытия, когда диск освещается только двойной, использовались две модели. Первая модель включает в себя диск и двойную звездную систему, которая находится в центре диска (см. рис. 2.1а). Во второй модели также присутствует слой газа за ударной волной, который частично заполняет пространство между внутренним краем аккреционного диска и массивным компонентом (см. рис. 2.1б). Этот слой газа изменяет излучение массивной звезды, прежде чем оно попадает на внутреннюю границу диска, а также сам производит

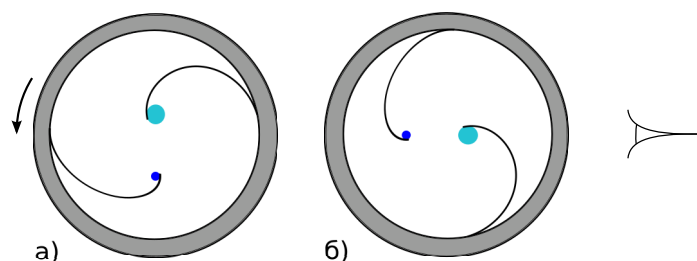


Рисунок 2.2: Схематический вид конфигурации двойной протозвезды и спиральных ударных волн в центральной области диска для двух моментов времени, различающихся на половину орбитального периода двойной. Кружками обозначены положения компонент двойной, дуги соответствуют ударным волнам, и кольцо соответствует внутренней границе аккреционного диска. Стрелка указывает направление вращения двойной, вещества диска и ударных волн. а) В момент после покрытия массивного компонента веществом за ударной волной. б) В момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной. Совместный результат диссертанта из работы [A2].

интенсивное излучение. Излучение компонента двойной промежуточной массы не учитывается во второй модели, поскольку компонент промежуточной массы затмевается массивным компонентом.

Эти две модели имитируют конфигурации ударных волн и компонент двойной, подобные тем, которые представлены на рис. 2.2. Затмение массивного компонента компонентом промежуточной массы не рассматривается в данном исследовании. Кроме того, в расчетах не учитывается наличие ударной волны, возникающей у компонента промежуточной массы, и вариации фактора диллюции из-за орбитального движения компонент двойной.

2.2.2 Моделирование с помощью CLOUDY

Чтобы оценить физические условия в аккреционном диске вокруг двойной звездной системы и вычислить интенсивность излучения от вещества за спиральной ударной волной, в данной работе использовался фотоионизационный программный код CLOUDY версии C13.02 (Ferland et al. [25]). Чтобы вычислить физические параметры аккреционного диска в момент после покрытия массивного компонента веществом за ударной волной, использовались следующие входные параметры CLOUDY:

- 1) Центральные звезды: массивная звезда и звезда промежуточной массы. Массивная звезда имеет массу $M = 13 M_{\odot}$, эффективную температуру

$T_{\text{eff}} = 29000$ K, ускорение свободного падения $\log g = 4.2$ dex, болометрическую светимость $L = 14295 L_{\odot}$, солнечную металличность (Grevesse & Sauval [127]). Модель атмосферы для этой звезды была взята из сетки моделей звездных атмосфер, представленной в работе Lanz & Hubeny [128]. У компонента промежуточной массы $M = 7 M_{\odot}$, $T_{\text{eff}} = 20000$ K, $\log g = 4.2$ dex, $L = 1741 L_{\odot}$, солнечная металличность, модель атмосферы из сетки, представленной в работе Castelli & Kurucz [129]. Звездные светимость и радиус были получены для заданных значений $\log g$, T_{eff} и M . Излучение двойной в центре диска рассчитано как суммарное излучение компонент, обе из которых находятся в самом центре диска.

- 2) Геометрия диска является плоской.
- 3) Внутренний радиус диска равен 1.9 а.е. Этот радиус примерно равен размеру центральной области диска, которая относительно свободна от вещества диска, рассчитанному для отношения масс компонент двойной 0.54 и большой полуоси двойной 1.145 а.е. Оценка размера этой центральной области была получена путем линейной экстраполяции значений, рассчитанных в работе Artymowicz & Lubow [130].
- 4) Внешний радиус диска 1000 а.е., что близко к значению, полученному в работе Preibisch et al. [131] из наблюдений околозвездного диска вокруг массивного молодого звездного объекта в туманности Киля.
- 5) Полувысота диска 0.38 а.е. Это значение было получено для отношения высоты диска к его внутреннему радиусу равного 0.2, что соответствует оценке, полученной в работе [131].
- 6) Обилие химических элементов в диске соответствует среднему из оценок обилия в туманности Ориона, полученных в работах [132–135]. Данный химический состав встроен в CLOUDY и соответствует химическому составу областей ионизованного водорода.
- 7) При расчетах были использованы встроенные в CLOUDY параметры пыли, соответствующие тем параметрам, оценки которых получены для туманности Ориона (Baldwin et al. [132]). Физика пыли описана в работах [132] и van Hoof et al. [136]. В расчеты включены графитовые и силикатные пылинки, размер которых распределен в 10 диапазонах. Мини-

мальный радиус графитовых и силикатных пылинок 0.03 мкм, а максимальный радиус составляет 0.25 мкм. Отношение массы пыли к массе газа составляет 0.005. Для того чтобы смоделировать сублимацию пылинок, обилие пыли варьировалось с температурой пыли как $\exp \left[- (T_d/T_{sub})^2 \right]$, где T_{sub} – температура сублимации для пылинки с данными размером и химическим составом. Данный вид зависимости от температуры был выбран, чтобы обеспечить хорошую сходимость вычислений с помощью CLOUDY.

- 8) Дополнительный нагрев из-за вязкой диссипации H рассматривается в рамках модели α -диска Шакуры и Сюняева [137]:

$$H = \alpha P \sqrt{\frac{GM}{r^3}}, \quad (2.1)$$

где α – безразмерный параметр модели α -диска, который считается постоянным по диску; P – локальное давление газа; G – гравитационная постоянная; M – общая масса двойной системы; r – расстояние до центра диска. В данной работе были проведены расчеты с $\alpha = 0.00008$ и $\alpha = 0.05$, что соответствует минимальному и максимальному значениям α , полученным в работе McClure et al. [138] моделированием наблюдаемых спектральных распределений энергии звезд типа Т Тельца.

- 9) Числовая плотность водорода (сумма числовых плотностей ионизованного, нейтрального, молекулярного и других состояний водорода) n_H обратно пропорциональна расстоянию от центра диска r^{-1} . Это согласуется с оценками из работы Pee et al. [139] для распределения поверхностной плотности в дисках вокруг массивных звезд в предположении, что профиль поверхностной плотности близок к профилю числовой плотности. Числовая плотность водорода на внутреннем крае диска составляет $10^{9.8} \text{ см}^{-3}$. Такое распределение плотности наряду с выбранными звездными параметрами позволяет получить высокую модельную яркость мазеров метанола II класса на 6.7 и 12.1 ГГц (см. раздел 2.3 для деталей расчета яркости мазеров).

Предположение об ионизационном равновесии газа на внутренней границе диска согласуется с выбранными параметрами диска. Это реализуется за счет высокой плотности водорода на внутреннем крае диска, соответствующей характерному времени рекомбинации водорода около нескольких

десятков минут. Это характерное время рекомбинации мало по сравнению с периодом двойной.

Масса звезд и значение большой полуоси двойной были выбраны такими, чтобы получить сверхзвуковую скорость орбитального движения массивного компонента и орбитальный период двойной равный 100 дням. Такой период близок к наблюдаемым периодам переменности мазерных источников излучения.

Входные параметры CLOUDY для расчета физических условий в диске в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной были такими же, что при расчете условий в момент после покрытия, за исключением параметров подсветки диска. В момент покрытия диск освещен излучением слоя вещества за ударной волной, который находится в центральной области диска, и излучением массивного компонента. Излучение слоя вещества за ударной волной было рассчитано с помощью CLOUDY в предположении, что этот слой имеет постоянные плотность и температуру. Слой вещества за ударной волной представляет собой половину плоского диска с внутренним радиусом и полувысотой 0.022 а.е. (радиус массивной звезды), внешним радиусом 0.2 а.е. Были проведены расчеты для двух значений плотности вещества за ударной волной $n_{\text{H}} = 10^{13.62} \text{ см}^{-3}$ и $n_{\text{H}} = 10^{13.32} \text{ см}^{-3}$. Значения плотности и размеры слоя вещества за ударной волной были выбраны таким образом, что N_{gas} увеличивается в ~ 100 и ~ 50 раз, соответственно, по сравнению с N_{gas} в модели без этого слоя. Такое возрастание лучевой концентрации согласуется с результатами теоретических расчетов, представленных в работе Сытова и др. [126]. Температура вещества за ударной волной равна 30222 К. Эта температура равна температуре T_s газа за ударной волной, рассчитанной согласно выражению (см., например, Lang [140]):

$$T_s = \frac{3}{16} \frac{\mu m_{\text{H}} v_s^2}{k_{\text{B}}}, \quad (2.2)$$

где m_{H} – масса атома водорода; μ – средняя молекулярная масса газа (для рассматриваемого химического состава газа это ~ 0.7 , с учетом того, что газ ионизован); k_{B} – постоянная Больцмана; v_s – скорость ударной волны равна 43.6 км с^{-1} и соответствует линейной скорости движения массивного компонента на круговой орбите. Следует отметить, что в действительности температура газа за ударной волной не постоянна. Плотный газ за ударной волной эффективно и быстро охлаждается за счет интенсивного излучения. Эффективность охлаждения уменьшается при уменьшении плотности газа за ударной волной. Скорость охлаждения также уменьшается с уменьшением температуры газа.

Таким образом, слой газа с температурой близкой к T_s может быть очень узким и расположен сразу за движущейся ударной волной. Но плотность и температура этого слоя близки к максимальным, и излучение этого слоя должно существенно влиять на суммарное излучение, падающее на внутреннюю границу диска.

В момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной болометрическая светимость излучения, которое падает на внутреннюю границу диска, увеличивается. Увеличение болометрической светимости достигает ~ 18 и ~ 27 раз, если плотность газа за ударной волной равна $n_H = 10^{13.32} \text{ см}^{-3}$ и $n_H = 10^{13.62} \text{ см}^{-3}$, соответственно.

Более подробное описание процедуры вычислений с помощью CLOUDY дано в приложении Б.

2.2.3 Физические условия в диске

Из расчетов в работе [24] следует, что высокая яркость мазеров метанола II класса может достигаться только тогда, когда плотность газа меньше, чем 10^9 см^{-3} и температура пыли, излучение которой накачивает мазер, превышает 100 К. Эта температура пыли близка к температуре термодесорбции метанола [141, 142]. Область диска с такими температурой пыли и плотностью газа находится в диапазоне расстояний от 12 до 120 а.е. от центра диска в момент после покрытия и от 12 до 400 а.е. в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной (см. рис. 2.3–2.6). Далее мы будем называть область диска с такими T_d и n_H областью диска с потенциалом для формирования мазера.

На рис. 2.4 видно, что распределение кинетической температуры газа в диске существенно зависит от величины α . В случае малых α и при плотности вещества за ударной волной $n_H = 10^{13.62} \text{ см}^{-3}$ в центре диска есть область с относительно низкой кинетической температурой газа. В этой области находится тепловой фронт, где изменяется степень ионизации газа, и вид функции охлаждения значительно изменяется (см. документацию CLOUDY). Когда плотность газа за ударной волной $n_H = 10^{13.32} \text{ см}^{-3}$, наличие теплового фронта выражено не так значительно. Температура газа в диске в этом случае в основном такая же, как и в случае более высокой плотности газа за ударной волной.

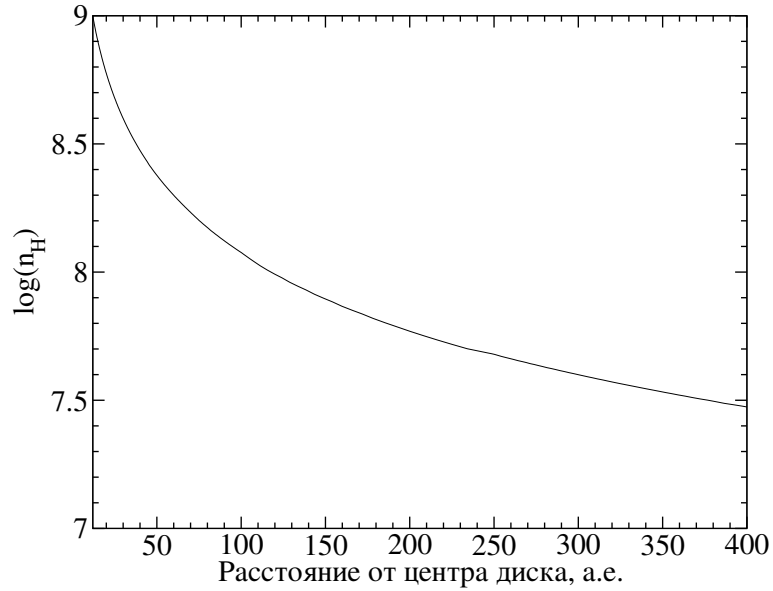


Рисунок 2.3: Распределение числовой плотности водорода (в см^{-3}) в области диска с потенциалом для формирования мазеров. Результат диссертанта из работы [A2].

Температура пыли зависит от ее размера и химического состава. Температура силикатных пылинок с наименьшим размером (радиус пылинки 0.03 мкм) в области диска с потенциалом для формирования мазеров представлена на рис. 2.5. Как было показано в работе Островского и Соболева [143], при расчетах накачки мазеров излучением пылинок с такими параметрами возможно воспроизвести наблюдаемые параметры излучения мазеров метанола II класса. Температура графитовых пылинок представлена на рис. 2.6. Температура силикатных и графитовых пылинок других размеров несколько больше, чем представленные значения.

Как видно из рис. 2.5 и рис. 2.6, в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной температура пыли в диске увеличивается. В рассматриваемой модели пыль в области диска с потенциалом для формирования мазеров нагревается в основном диффузным излучением. Скорость нагрева пыли из-за диффузного излучения порядка 10^{-13} эрг с^{-1} см^{-3} . При такой скорости нагрева характерное время повышения температуры пыли на 10 К составляет порядка нескольких часов. Характерное время повышения температуры газа также должно быть мало по сравнению с орбитальным периодом двойной, так как тепловое равновесие между пылью и газом устанавливается быстро при высоких плотностях газа. Таким образом, приближение теплового равновесия вещества аккреционного диска является достаточно точным.

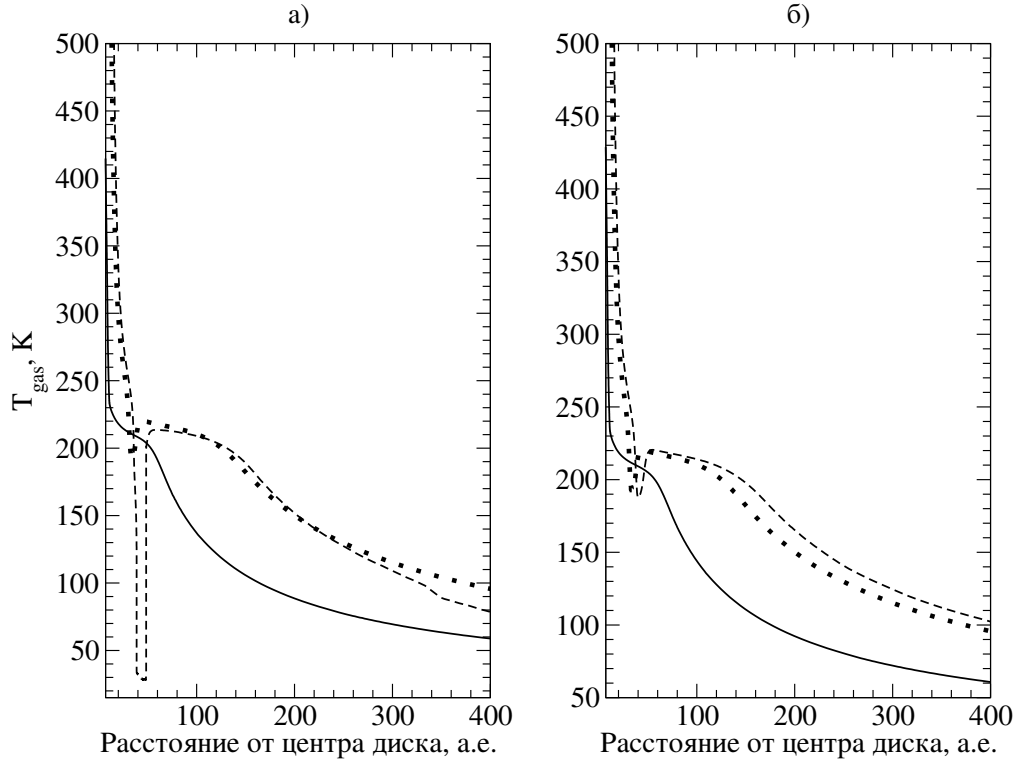


Рисунок 2.4: Кинетическая температура газа в области диска с потенциалом для формирования мазера в момент после покрытия (*сплошная линия*) и в момент покрытия массивного компонента вещества за ударной волной с плотностью $n_{\text{H}} = 10^{13.32} \text{ см}^{-3}$ (*пунктирная линия с точками*) и $n_{\text{H}} = 10^{13.62} \text{ см}^{-3}$ (*пунктирная линия со штрихами*). а) Модель диска рассчитана с $\alpha = 0.00008$. б) Модель диска рассчитана с $\alpha = 0.05$. Результат диссертанта из работы [A2].

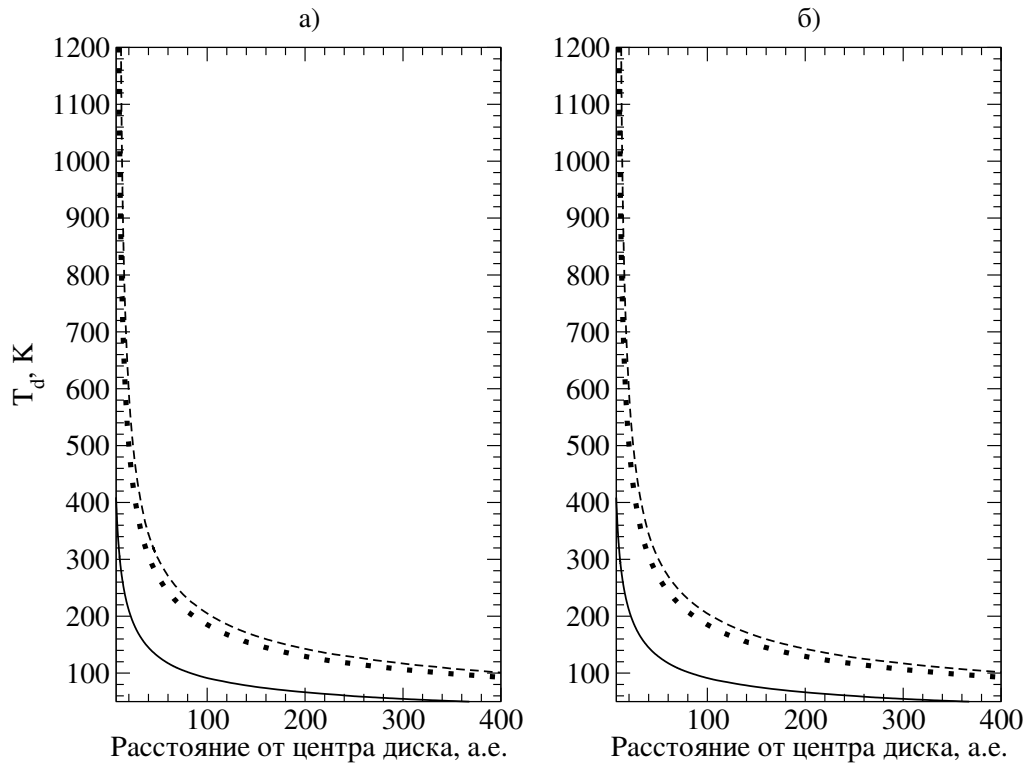


Рисунок 2.5: Температура силикатовых пылинок малого радиуса (радиус пылинки 0.03 мкм) в области диска с потенциалом для формирования мазеров в момент после покрытия (*сплошная линия*) и в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной с $n_{\text{H}} = 10^{13.32} \text{ см}^{-3}$ (*пунктирная линия с точками*) и $n_{\text{H}} = 10^{13.62} \text{ см}^{-3}$ (*пунктирная линия со штрихами*). а) Модель диска рассчитана с $\alpha = 0.00008$. б) Модель диска рассчитана с $\alpha = 0.05$. Результат диссертанта из работы [A2].

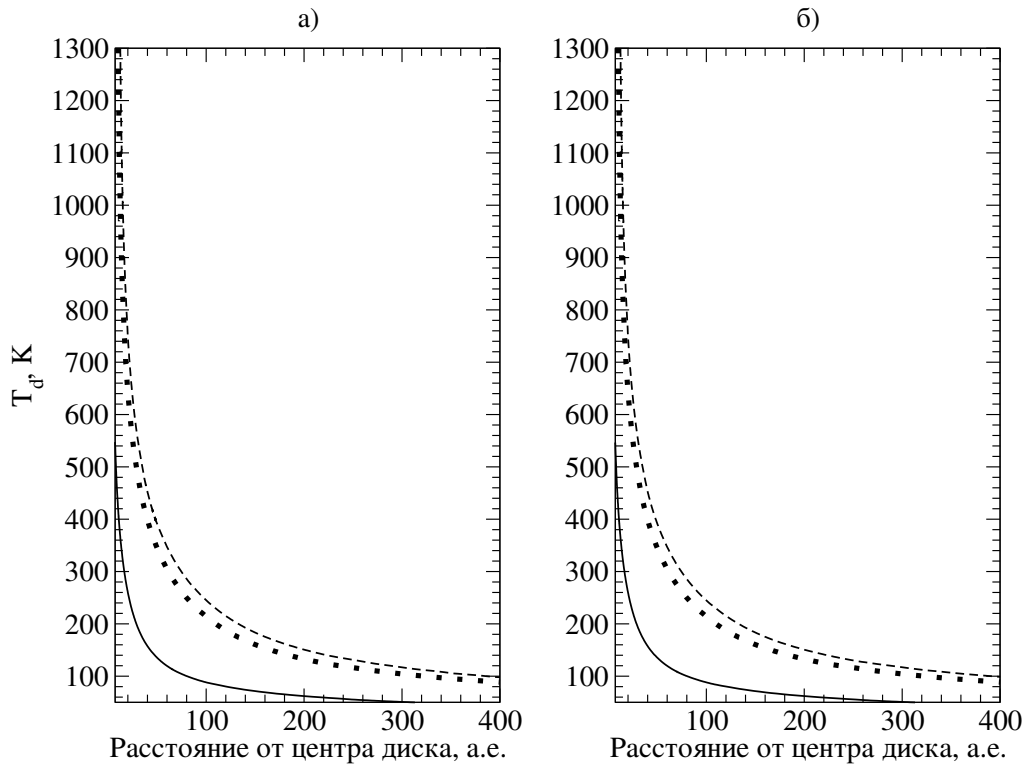


Рисунок 2.6: То же самое, что и на рис. 2.5, но для графитовых пылинок малого радиуса. Результат диссертанта из работы [A2].

Скачок температуры пыли в момент покрытия позволяет поддерживать высокое обилие метанола в газовой фазе в диске, даже если температура пыли падает ниже 100 K после покрытия. Это связано с тем, что характерное время изменения обилия метанола в газовой фазе значительно превышает орбитальный период двойной.

Температура пыли практически не зависит от величины α . Это означает, что в случае низкой вязкости в диске может быть область, где кинетическая температура газа низка, а температура пыли высока. Такие условия способствуют формированию очень ярких мазеров, потому что чем больше разница между температурами газа и пыли, тем выше яркость мазеров на 6.7 ГГц (Cragg et al. [24]). Таким образом, в рассматриваемой модели α является важным параметром, который может существенно влиять на яркость мазеров, формирующихся в аккреционном диске.

2.3 Моделирование мазеров метанола II класса

Для того чтобы оценить вероятность формирования мазеров метанола II класса, на основе рассчитанных физических условий в аккреционном диске для

различных прицельных параметров были рассчитаны оптические толщины и температуры возбуждения для мазеров на 6.7, 9.9, 12.1 и 107 ГГц. При расчетах предполагалось следующее:

- 1) диск наблюдается с ребра;
- 2) физические условия вдоль луча зрения постоянны и совпадают с условиями на расстоянии от центра диска, которое равно данному прицельному параметру.

Для вычислений оптических толщин и температур возбуждения мазерных переходов использовался метод, представленный в работе Sobolev & Deguchi [87]. Расчет переноса излучения в линиях выполнялся в приближении большого градиента скорости. Входными параметрами при расчетах были спектр накачивающего излучения, кинетическая температура газа, числовая плотность водорода, отношение тангенциальной оптической толщины к продольной и удельная лучевая концентрация $N_M/\Delta V$ молекул метанола. Зависимость удельной лучевой концентрации от прицельного параметра, показанная на рис. 2.7, была получена в предположении гауссова профиля линий метанола как:

$$\frac{N_M}{\Delta V} = \frac{X_M f}{\Delta V \epsilon^{-1}} \int_0^{L(p)} n_H(l) \exp \left(-\frac{(V(p) - V(l))^2}{\Delta V^2} \right) dl, \quad (2.3)$$

где X_M – обилие метанола по отношению к H_2 постоянно и равно 10^{-6} ; $L(p)$ – протяженность области диска с потенциалом для формирования мазеров вдоль луча зрения для данного прицельного параметра p ; f – коэффициент, который учитывает уменьшение оптической толщины τ из-за турбулентных движений в диске (см. ниже); ΔV – ширина мазерной линии, которая равна 0.5 км с^{-1} , что соответствует характерной ширине наблюдаемых линий; $n_H(l)$ – числовая плотность водорода на заданном расстоянии l вдоль луча зрения; ϵ^{-1} – отношение тангенциальной оптической толщины к продольной, было постоянным и равным 5; $V(p)$ и $V(l)$ являются скоростями газа для данных прицельного параметра p и расстояния l вдоль луча зрения, соответственно. Предполагалось, что спектр турбулентности в диске квази-Колмогоров и аналогичен тому, который рассматривался в работах Соболева и др. [144] и Wallin et al. [145]. Для расчетов было принято значение $f = 0.69$, что соответствует максимальному значению, полученному в работе [144]. Скорости газа были получены в предположении кеплеровского вращения аккреционного диска вокруг двойной.

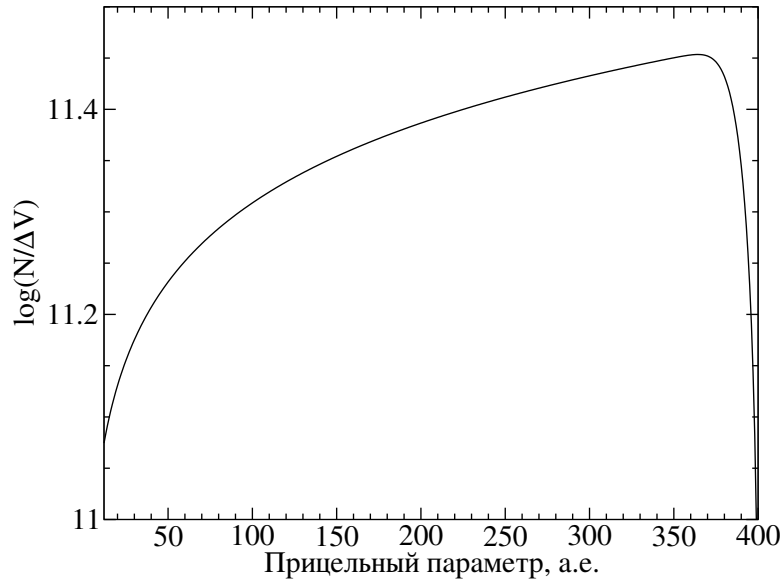


Рисунок 2.7: Удельная лучевая концентрация метанола (в $\text{см}^{-3} \text{ с}$). Результат диссертанта из работы [A2].

В данной работе рассматривались только прицельные параметры, превышающие 10 а.е. Интенсивность накачивающего излучения для данных значений прицельного параметра была вычислена с помощью CLOUDY.

Для того, чтобы охарактеризовать возбуждение мазерных переходов на этих рисунках также представлены факторы возбуждения (первоначально «поправочные коэффициенты за счет вынужденного излучения») C , которые получены согласно Goldberg [146] как:

$$C = 1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T_{ex}}\right), \quad (2.4)$$

где h – постоянная Планка; ν – частота мазерного перехода; T_{ex} – температура возбуждения. В данной работе используется функция C , а не T_{ex} , потому что она не имеет особенностей. Отрицательные значения оптической толщины и C означают наличие в данном переходе мазерного усиления, в то время как положительные значения означают наличие поглощения в этом переходе. Уменьшение оптической толщины от -1 до -10 соответствует увеличению яркостной температуры мазерного излучения примерно на 4 порядка. На рис. 2.8 и рис. 2.9 видно, что в диске могут быть выделены три области в зависимости от поведения яркости мазеров в момент покрытия и после покрытия массивного компонента веществом за ударной волной.

Первая область диска находится в диапазоне прицельных параметров от 12 до 50 а.е. Изменение яркости мазеров в этой области диска существенно зави-

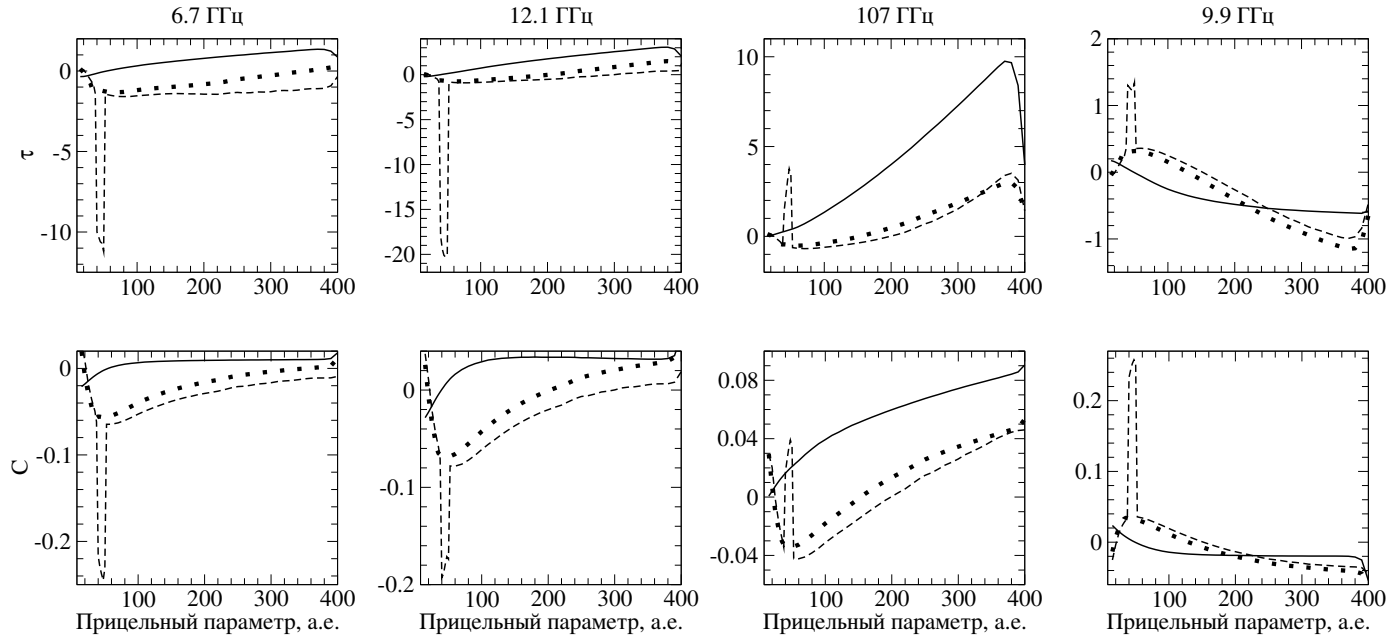


Рисунок 2.8: Оптические толщины τ и факторы возбуждения C в мазерных переходах, рассчитанные для моделей диска с $\alpha = 0.00008$. *Сплошная линия* — в момент после покрытия; *пунктирная линия с точками* — в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной с $n_{\text{H}} = 10^{13.32} \text{ см}^{-3}$; *пунктирная линия со штрихами* — в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной с $n_{\text{H}} = 10^{13.62} \text{ см}^{-3}$. Отрицательные оптическая толщина и C означают наличие мазерного усиления в данном переходе, в то время как положительные значения τ и C означают наличие поглощения в переходе. Результат диссертанта из работы [A2].

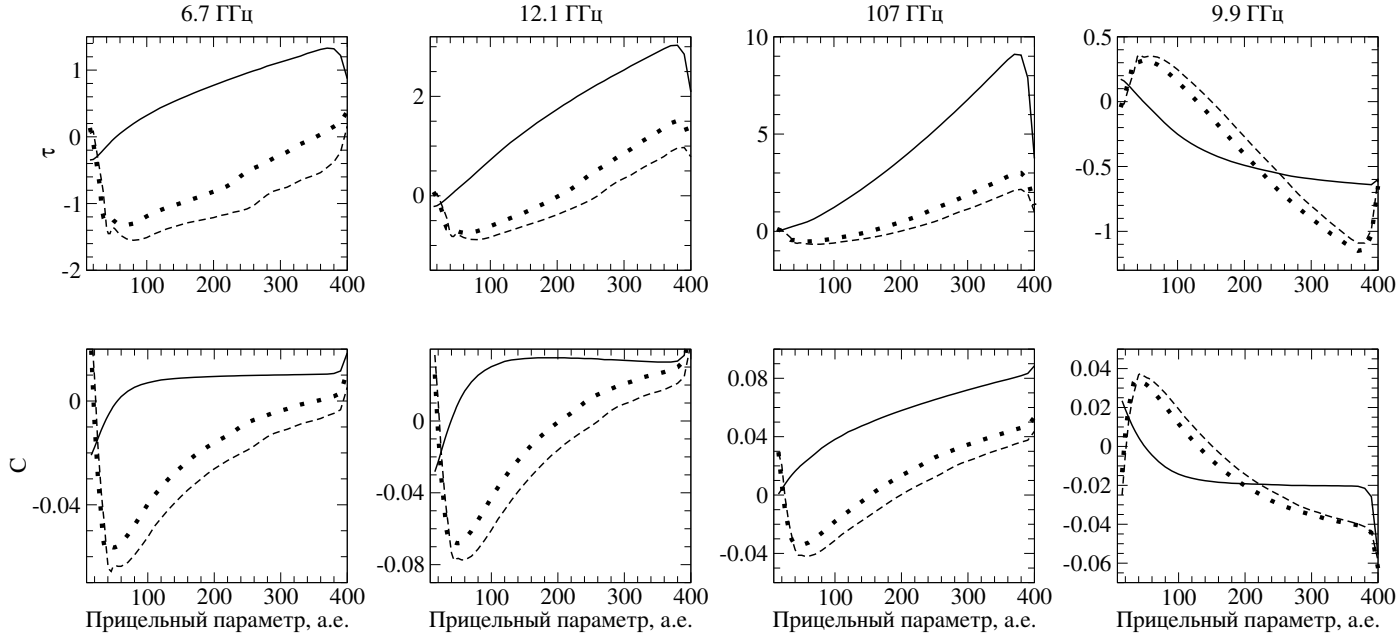


Рисунок 2.9: То же самое, что и на рис. 2.8, но в модели диска, рассчитанной для $\alpha = 0.05$. Результат диссертанта из работы [A2].

сит от вязкости вещества диска. В этой области диска в момент после покрытия оптическая толщина и C в мазерных переходах на 6.7 и 12.1 ГГц отрицательны, а τ и C перехода на 9.9 ГГц положительны. В момент покрытия τ и C для переходов на 6.7 и 12.1 ГГц уменьшаются, а для перехода на 9.9 ГГц τ и C увеличиваются. Этот эффект в значительной степени зависит от вязкости вещества в диске. Когда вязкость мала, уменьшение τ и C для переходов на 6.7 и 12.1 ГГц в момент покрытия гораздо более значительно по сравнению со случаем, когда вязкость относительно велика. Яркость мазеров на 6.7 и 12.1 ГГц может увеличиться в момент покрытия примерно на 4 и 8 порядков величины, соответственно, если $\alpha = 0.00008$, и только примерно на 1 порядок величины, если $\alpha = 0.05$.

В первой области диска τ и C для перехода на 107 ГГц в момент после покрытия в основном положительные, то есть переход квази-тепловой. Для $p < 30$ а.е. переход на 107 ГГц значительно перегрет: C уменьшается и приближается к 0, температура возбуждения превышает 1000 К и значительно выше, чем кинетическая температура газа, которая колеблется в этой области диска от 200 до 400 К. Если вязкость в диске мала, то яркость мазера на 107 ГГц чувствительна к плотности газа за ударной волной. Яркость мазера на 107 ГГц может уменьшаться в момент покрытия, если плотность газа за ударной волной высока.

Вторая область диска соответствует прицельным параметрам от 50 до 200 а.е. В этой области диска τ и C для переходов на 6.7, 12.1 и 107 ГГц положительны в момент после покрытия и становятся отрицательными в момент покрытия. Значения τ и C в момент после покрытия положительны для перехода на 9.9 ГГц. В момент покрытия τ и C для перехода на 9.9 ГГц остаются отрицательными, и их абсолютные значения уменьшаются в $150 < p < 200$ а.е. Это означает, что в момент покрытия в диапазоне прицельных параметров $150 < p < 200$ а.е. переход на 9.9 ГГц остается мазерным, и его яркость уменьшается. В наружных частях этой области диска уменьшение яркости мазера на 9.9 ГГц становится заметным только тогда, когда увеличение лучевой концентрации N_{gas} близко к своему максимальному значению. Согласно работе [126], это максимальное значение составляет около 100, а для рассмотренных в данной главе параметров модели это значение соответствует плотности газа за ударной волной $n_H = 10^{13.62} \text{ см}^{-3}$. В диапазоне прицельных параметров от 50 до 150 а.е. τ и C для перехода на 9.9 ГГц в момент покрытия становятся положительными.

Третья область диска соответствует прицельным параметрам 200–400 а.е. и отличается от двух внутренних областей поведением яркости мазера на 9.9 ГГц. В отличие от поведения мазера на 9.9 ГГц во второй области диска, τ и C для перехода на 9.9 ГГц остаются отрицательными, и их абсолютные значения в момент покрытия увеличиваются. В рассматриваемой модели яркость мазера на 9.9 ГГц в этой области диска увеличивается примерно в 2 раза в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной.

Также в данной работе были проведены расчеты для других значений ϵ^{-1} в диапазоне от 1 до 25. Поведение τ и C остались прежними.

2.4 Выводы

С помощью простой модели в данной главе было показано, что в аккреционном диске вокруг двойной со структурой подобной той, которая представлена в работе Сытова и др. [123], подсвечивание диска излучением горячего вещества за спиральной ударной волной приводит к изменению температуры пыли и газа в диске и значительно увеличивает вероятность мазерной вспышки в диске. Влияние излучения вещества за ударной волной на яркость мазеров в диске зависит от плотности этого вещества. В этом исследовании был рассмотрен случай, когда диск подсвечивается веществом ударной волны, возникающей

рядом с поверхностью массивного компонента двойной. Момент, когда основание ударной волны пересекает воображаемую линию между рассматриваемой областью диска и центром диска, соответствует максимальному росту лучевой концентрации N_{gas} (определенной в разделе 2.2.1) и значительному увеличению интенсивности излучения в данной области диска. Интенсивность этого излучения уменьшается по мере того, как спиральная ударная волна вращается и N_{gas} уменьшается. Согласно работе Сытова и др. [126], N_{gas} быстро возрастает, а затем медленно уменьшается по мере того, как ударная волна вращается. Таким образом, можно предположить, что изменения яркости мазеров следуют за изменениями N_{gas} с орбитальной фазой, воспроизводя характерные особенности профиля мазерных вспышек в источниках G9.62+0.20 и G351.42+0.64, и некоторых других мазерных источниках: быстрый рост и последующий относительно медленный спад яркости [147–149]. В работе [126] показано, что модельное значение N_{gas} зависит от угла наклона двойной звезды относительно наблюдателя. Соответственно профиль мазерной вспышки также может зависеть от наклона двойной.

В рассмотренной модели вероятность мазерной вспышки в области диска, близкой к ее центру, зависит от вязкости вещества в диске, которая задается параметром α . Когда вязкость относительно мала ($\alpha = 0.00008$), в небольшой области диска (15–50 а.е. от центра диска) в момент покрытия может возникать разность температур пыли и газа величиной до ~ 100 К. В результате, в момент покрытия яркость мазеров на 6.7 и 12.1 ГГц в этой области диска значительно выше, когда вязкость мала, по сравнению со случаем, когда вязкость относительно велика ($\alpha = 0.05$) и большой разницы температур газа и пыли не возникает.

Когда вязкость диска мала, яркость мазера на 107 ГГц, формирующегося на прицельных параметрах 12–50 а.е. в момент покрытия, сильно зависит от плотности газа за ударной волной. При плотности, которая максимальна среди рассмотренных в данном исследовании, яркость мазера на 107 ГГц меньше по сравнению со случаем, когда плотность газа за ударной волной меньше. Таким образом, по мере того, как спиральная ударная волна вращается и N_{gas} увеличивается, в момент покрытия может наблюдаться уменьшение яркости мазера на 107 ГГц.

Максимальная яркость мазера на 9.9 ГГц в предложенной модели достигается на больших расстояниях от центра диска, по сравнению с другими мазерами, рассмотренными в данной главе. Это означает, что в одном и том же объекте

мазеры на 9.9 ГГц могут наблюдаться в областях диска и на скоростях, отличных от тех, для мазеров на 6.7, 12.1 и 107 ГГц. Яркость мазеров на 9.9 ГГц, формирующихся на прицельных параметрах 50–200 а.е., уменьшается в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной. Этот эффект сильно зависит от плотности вещества за ударной волной и становится менее выраженным с увеличением расстояния от центра диска, полностью пропадая на 200 а.е.

Период мазерных вспышек в предложенной модели равен орбитальному периоду двойной. Если двойная состоит из двух массивных звезд, то можно ожидать, что период мазерных вспышек будет равен половине орбитального периода. Амплитуда периодических вспышек чувствительна к изменениям плотности газа за ударной волной и локальным параметрам в области диска, где формируются мазеры. В переходах на 6.7 и 12.1 ГГц зависимость яркости мазеров от интенсивности подсветки диска (в момент покрытия или после покрытия) одна и та же. В переходах на 107 и 9.9 ГГц могут наблюдаться периодические вспышки либо резкие уменьшения яркости мазерного излучения в зависимости от свойств диска.

В этой главе была рассмотрена стационарная осесимметричная модель диска с монотонной зависимостью параметров от расстояния от центра диска. Реальные диски являются неоднородными. Параметры дисков вокруг двойных систем, а также параметры самих двойных систем, могут изменяться с течением времени. Эти изменения могут привести к изменениям в профилях вспышек мазерного излучения в различных переходах.

Эпизодическое возрастание темпа аккреции представляет собой еще одну причину возрастания звездной светимости и плотности газа за спиральными ударными волнами. Это возрастание может производить эффект, подобный тому, который возникает в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной. По нашим расчетам изменение светимости примерно на одну четверть порядка величины приводит к значительным изменениям яркости мазеров, образующихся в аккреционном диске. В данной работе не рассматривались изменения темпа аккреции, но можно ожидать, что подобные вариации светимости из-за эпизодических вариаций темпа аккреции могут приводить к эпизодическим вспышкам / уменьшению яркости мазеров.

Глава 3

Мониторинг источника V645 Cyg в оптическом и радио диапазонах

3.1 Введение

V645 Cyg (AFGL 2789, $m_V \sim 13$, $m_R \sim 12$) является объектом, который впервые был классифицирован как переменная звезда в работе Hoffmeister et al. [150]. Параметры и природа этого объекта являются довольно неопределенными. В работе Cohen [151] с использованием оптических спектров низкого разрешения было получено, что объект является звездой спектрального класса O7 V. Humphreys et al. [152] в результате анализа оптических спектров, данных UBVR и широкополосной инфракрасной фотометрии, а также инфракрасных спектров низкого разрешения предположили, что этот объект является A5e звездой с оболочкой. Elia et al. [153] провели моделирование спектрального распределения энергии излучения этого объекта в инфракрасном диапазоне и получили, что спектральный класс объекта A0. Однако стоит отметить, что их модельная оценка расстояния 258 ± 12 пк значительно отличается от оценок, полученных другими авторами, которые лежат в диапазоне от 3 до 6 кпк (Мирошниченко и др. [19]). В том числе, их модельная оценка отличается от полученной при измерениях параллакса мазеров воды 3.07 ± 0.30 кпк (Oh et al. [154]). В работе Goodrich [155] также предполагается, что объект представляет собой звезду спектрального класса A0. В работе Clarke et al. [156] на основе оптических и инфракрасных спектральных данных авторы предположи-

ли, что V645 Cyg представляет собой редкий тип переходных объектов между массивным молодым звездным объектом и Oe звездой, окруженной областью ионизованного водорода с относительно низкой поверхностной яркостью.

В работе Мирошниченко и др. [19], как следствие очень малого числа высоковозбужденных линий и ярких эмиссионных компонент в профилях линий гелия в оптических спектрах высокого разрешения, была получена оценка эффективной температуры $\lesssim 25000$ К. Эта оценка исключает классификацию V645 Cyg как звезды O-класса и больше соответствует спектральным классам более ранним, чем B1–B2. Также Мирошниченко и др. заключили, что объект не может быть сверхгигантом A-класса, так как для звезд таких классов нехарактерны интенсивные эмиссионные линии и высоковозбужденные эмиссионные линии, наблюдаемые в спектре V645 Cyg. Более того, эти же авторы, исходя из оценок светимости ($2\text{--}7 \times 10^4 L_{\odot}$) и эффективной температуры, сделали вывод о том, что V645 Cyg, скорее всего, не является объектом, находящимся на стадии до главной последовательности. Таким образом, согласно Мирошниченко и др. [19], объект является звездой B-класса на главной последовательности.

V645 Cyg находится в молекулярном облаке с высокой плотностью газа. С V645 Cyg ассоциируется биполярное молекулярное истечение, которое на пространственных масштабах порядка $15''$ совпадает с истечением, наблюдаемым в оптическом диапазоне (Goodrich [155], Verdes-Montenegro et al. [157]) и почти параллельно линии сервер-юг. На пространственных масштабах порядка $1'$ молекулярное истечение меняет свое направление. Излучение в радиоконтинууме, которое было обнаружено на масштабах порядка $10''$ в работах [158–160], также можно связать с истечением. Girart et al. [160] обнаружили переменность потока излучения в радиоконтинууме и предположили, что она может быть связана с переменным темпом самого истечения, либо с рекомбинацией ионизованного газа, которая происходит на относительно коротких промежутках времени. Также следует отметить, что светимость V645 Cyg в континууме на 6 см ($10^{19.1}$ эрг ГГц $^{-1}$ с $^{-1}$ на расстоянии 3.5 кпк) примерно на два порядка больше ожидаемой для сверхгиганта A-класса и в большей степени соответствует светимости OB-звезд (Skinner et al. [159]).

Данные наблюдений, представленные в работе Hamann & Persson [161], свидетельствуют о наличии звездного ветра или истечения из центрального объекта со скоростями порядка 1000 км с $^{-1}$. Как отмечено в работе Clarke et al. [156], истечения с подобными скоростями характерны в большей степени для OB-звезды, но не для массивных молодых звездных объектов.

Блеск V645 Cyg в оптическом диапазоне варьируется на промежутках времени от нескольких часов до нескольких лет [19]. По данным мониторинга Шевченко и др. [162] в фильтрах UBVR, переменность V645 Cyg носит нерегулярный характер. В работе Мирошниченко и др. [19] обобщены данные наблюдений V645 Cyg в ближнем инфракрасном диапазоне и показано, что поток излучения в этом диапазоне переменный, а также высказано предположение о возможном наличии положительной корреляции между оптическим и инфракрасными потоками излучения этого объекта. Оптические и инфракрасные показатели цвета стабильны на длительных периодах времени. В области радиусом $15'$ вокруг V645 Cyg были найдены несколько кандидатов в молодые звездные объекты, которые также демонстрируют нерегулярную переменность в оптическом диапазоне (Соболев и др. [163]).

С V645 Cyg ассоциируются мазеры воды (Comoretto et al. [164]), гидроксила (Morris & Kazes [165]) и метанола [166–168]. В работе Błaszczewicz & Kus [168] отмечена переменность отдельных компонент в спектре мазера метанола, который ассоциируется с V645 Cyg. Согласно результатам, представленным в работе Baе et al. [169], профили линий мазеров воды также меняются со временем. В частности, в мазерных линиях воды замечен дрейф по лучевой скорости $0.5\text{--}2.2$ км с $^{-1}$ в год.

Можно заключить, что V645 Cyg, по всей видимости, представляет собой редкий класс очень молодых В-звезд, которые ещё не совсем освободились от плотного газа в своем ближайшем окружении. V645 Cyg демонстрирует переменность в различных спектральных диапазонах и на различных временных интервалах.

3.2 Данные мониторинга в оптическом и радио диапазонах

Наблюдения V645 Cyg в оптическом диапазоне и их обработка проводились научными сотрудниками Коуровской астрономической обсерватории С.Ю. Гордой и О.А. Давыдовой. Данные оптических наблюдений V645 Cyg в фильтрах V и R получены на телескопе АЗТ-3 Коуровской астрономической обсерватории, оборудованном ПЗС (прибор с зарядовой связью) камерой Alta-U6 (с чипом 1048×1048 пикселей Kodak KAF-1001E). ПЗС кадры содержат информацию об объектах вокруг V645 Cyg в пределах поля размером $40 \times 40'$. Об-

работка ПЗС кадров производилась с помощью программного пакета Miniwin (<http://c-munipack.sourceforge.net>). При мониторинге V645 Cyg в качестве звезд сравнения использовались три объекта из каталога 2MASS: 21401743+5013545, 21395248+5015526 и 21393905+5012016. В качестве оценки погрешности измерений блеска V645 Cyg использовалась дисперсия разностей блеска звезд сравнения. Данные наблюдений представлены в работе Соболева и др. [163].

Данные наблюдений V645 Cyg в мазерных линиях на 6.7 ГГц были получены на 32-м радиотелескопе в Торунь (Польша). Наблюдения и обработка проводились научной группой под руководством профессора М. Щымчака. Наблюдения проводились в рамках программы длительного мониторинга большого количества мазерных источников, который проводится на 32-м телескопе в Торунь. Параметры наблюдений и некоторые детали обработки данных, полученных в рамках этого длительного мониторинга, представлены в работах Szymczak et al. [170, 171]. Данные наблюдений были получены с использованием двухканального приемника с усилителями на транзисторах с высокой подвижностью электронов. Наблюдения проводились одновременно в двух противоположных круговых поляризациях в режиме частотной модуляции. Спектральное разрешение после сглаживания методом Хэннинга составляет 0.05 км с^{-1} . Калибровка по плотности потока излучения проводилась при наблюдениях источников 3C123 и Vir A в континууме. Плотности потоков 3C123 и Vir A были взяты из работы [172]. Полная ширина на половине максимума диаграммы направленности телескопа на 6.7 ГГц составляет $5.5'$, среднеквадратичная ошибка позиционирования составляет $22''$. Характерная шумовая температура была порядка 40 К.

Характерная ошибка калибровки по плотности потока излучения при наблюдениях в рамках программы мониторинга мазерных источников на 32-м радиотелескопе в Торунь составляет $\pm 15\%$. Результаты радионаблюдений V645 Cyg, представленные в данной главе, предварительны и для них эта ошибка калибровки может быть несколько выше.

Мониторинг в оптическом и радио диапазонах производился в близкие даты в течение одного и того же периода времени с 2009 по 2012 годы. В этом плане представленные данные наблюдений уникальны, так как ни один переменный мазерный источник еще не наблюдался почти одновременно в оптическом и радио диапазонах в течение относительно большого промежутка времени. Наблюдения в оптическом диапазоне производились в среднем раз в 2 месяца, в радиодиапазоне – 4 раза в 2 месяца.

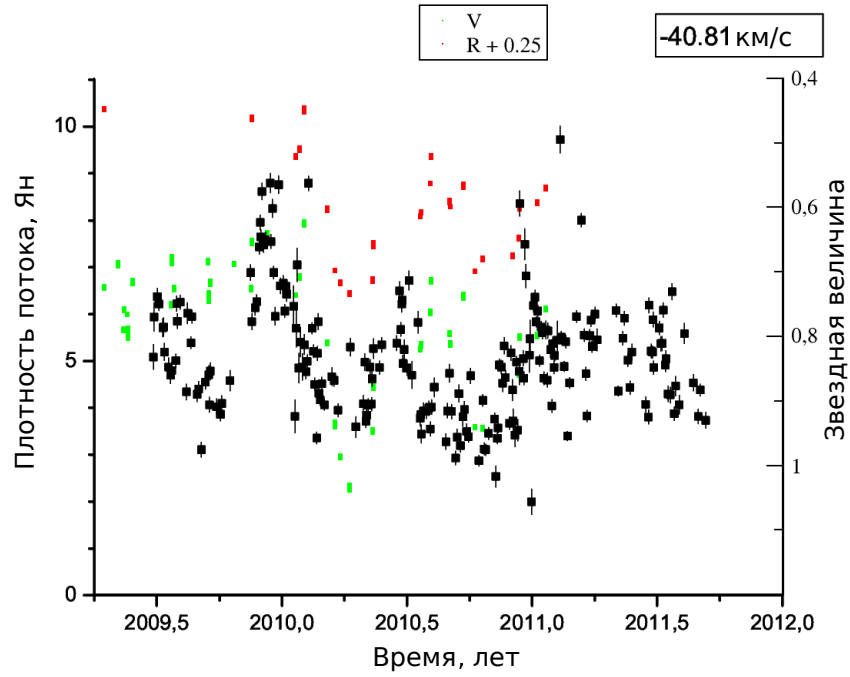


Рисунок 3.1: Данные мониторинга V645 Cyg в оптическом диапазоне и в мазерной линии на 6.7 ГГц. Черные точки – плотность потока излучения компоненты мазерной линии на скорости $V_{\text{LSR}} = -40.81 \text{ км с}^{-1}$. Зеленые и красные точки – разница блеска между V645 Cyg и звездами сравнения в фильтрах V и R, соответственно. Результат представлен на конференции [B3]. Данный результат на защиту не выносится.

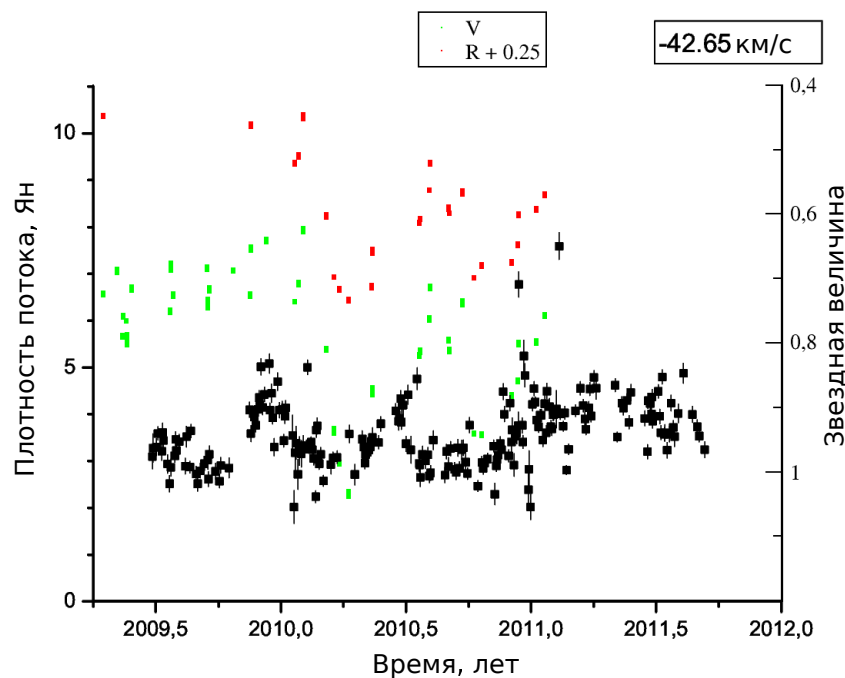


Рисунок 3.2: То же самое, что и на рисунке 3.1, но для компоненты мазерной линии на $V_{\text{LSR}} = -42.65 \text{ км с}^{-1}$. Результат представлен на конференции [B3]. Данный результат на защиту не выносится.

Как видно из рисунков 3.1–3.4, блеск V645 Cyg в фильтрах V и R и плотность потока в мазерной линии на 6.7 ГГц меняются с течением времени. Максимальное изменение блеска в V и R составляет 0.4 звездной величины, максимальное изменение плотности потока излучения на 6.7 ГГц составляет 40 %. На основе представленных данных можно предположить равенство характерных времен переменности в оптическом диапазоне и мазерной линии. Увеличение и уменьшение плотности потока излучения в мазерной линии соответствуют увеличению и уменьшению блеска в оптическом диапазоне в ближайшую дату.

3.3 Обсуждение

3.3.1 Область формирования мазеров метанола II класса

По данным наблюдений Слыша и др. [173] мазерные пятна воды, ассоциирующиеся с V645 Cyg, образуют плотную группу на небе. Компоненты мазерной линии воды находятся в диапазоне лучевых скоростей от -55 до -39 км с^{-1} . Можно выделить две группы компонент мазерной линии: первая группа в диа-

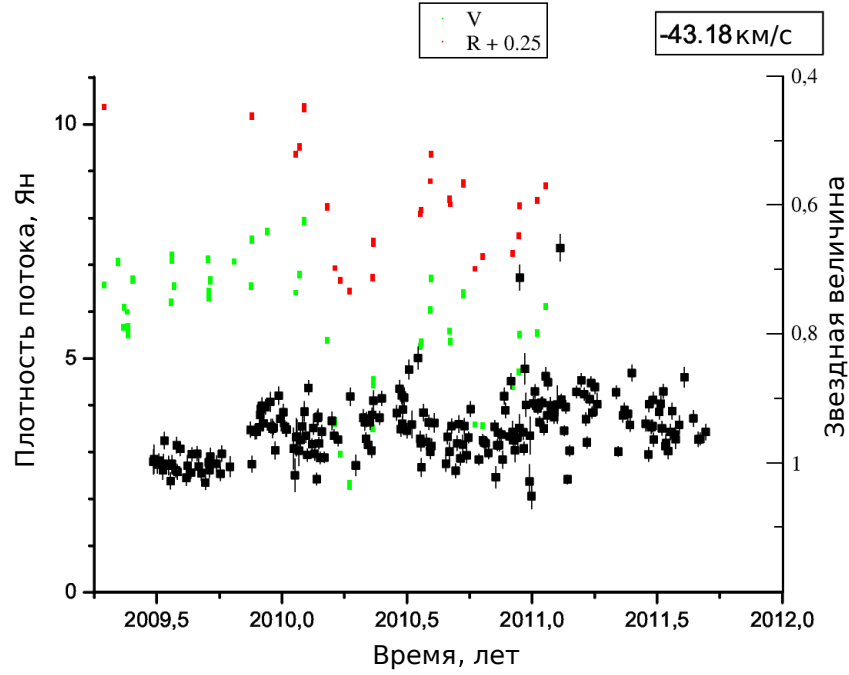


Рисунок 3.3: То же самое, что и на рисунке 3.1, но для компоненты мазерной линии на $V_{\text{LSR}} = -43.18 \text{ км с}^{-1}$. Результат представлен на конференции [B3]. Данный результат на защиту не выносится.

пазоне V_{LSR} от -55 до -48 км с^{-1} , вторая – от -42 до -39 км с^{-1} . Максимальное расстояние между мазерными пятнами метанола на небе примерно в три раза больше, чем между мазерными пятнами воды. При этом компоненты мазерной линии метанола находятся в интервале V_{LSR} от -45 до -30 км с^{-1} . Все эти данные хорошо согласуются с данными наблюдений мазеров в направлении V645 Cyg других авторов (см. раздел 3.1, где приведены ссылки на работы по наблюдениям мазеров). На основе этих данных Слыш и др. [173] предположили, что мазеры метанола и водяного пара, ассоциирующиеся с V645 Cyg, формируются в околозвездном диске, который вращается по закону Кеплера вокруг звезды с массой $10M_{\odot}$ и виден наблюдателю с ребра.

В самом деле, есть свидетельства того, что центральный объект окружен диском. В работе Namann & Persson [161] была предложена модель, согласно которой узкие линии K I и Fe I в оптическом спектре V645 Cyg формируются в компактном околозвездном диске. Многие линии поглощения, смещенные в голубую область спектра, формируются в истечении или ветре со скоростями порядка 1000 км с^{-1} . Оптически толстый диск ориентирован «плашмя» и закры-

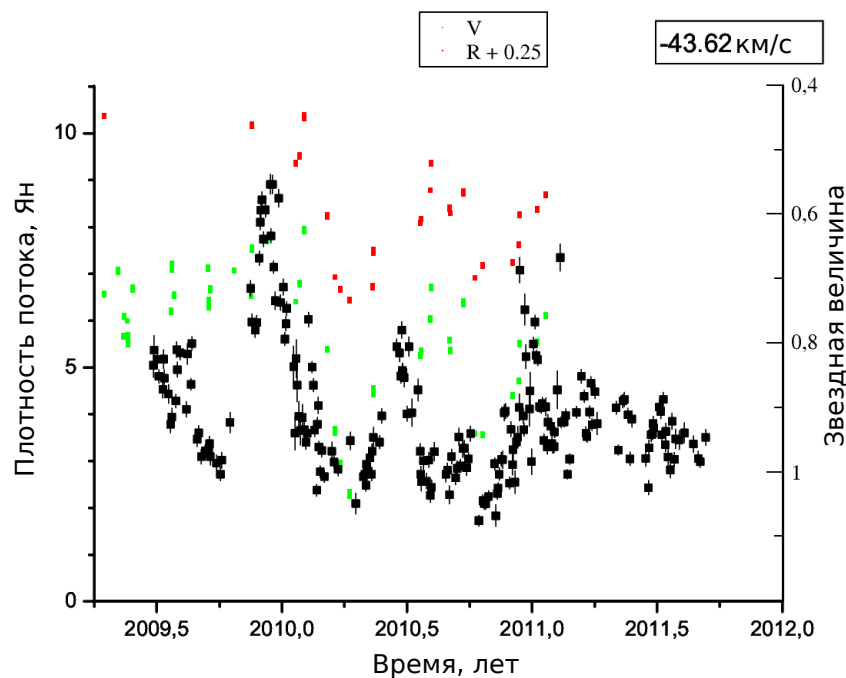


Рисунок 3.4: То же самое, что и на рисунке 3.1, но для компоненты мазерной линии на $V_{\text{LSR}} = -43.62 \text{ км с}^{-1}$. Результат представлен на конференции [В3]. Данный результат на защиту не выносится.

вает от наблюдателя удаляющуюся часть истечения, в связи с чем в спектрах отсутствуют линии поглощения, которые смещены в красную область спектра.

Данные спектроскопических наблюдений V645 Cyg Мирошниченко и др. [19] также говорят о наличии диска и истечения. Мирошниченко и др. также сделали предположение, что отсутствие резкого уменьшения интенсивности в красных частях профиля оптических линий, которые формируются близко к звезде, свидетельствует об отсутствии вещества диска в непосредственной близости от звезды и, таким образом, об отсутствии аккреции на звезду. Авторы также отметили, что значительный инфракрасный избыток в направлении V645 Cyg свидетельствует о наличии большого количества плотного вещества в окрестности звезды. При этом в направлении на звезду не наблюдается существенного поглощения. Все это может свидетельствовать о том, что пыль в окрестностях звезды также образует структуру в виде диска, который виден «плашмя». Более того в работах [19, 174, 175] было показано, что звезда также может быть окружена оптически тонкой оболочкой из пыли, размеры которой превышают размеры диска.

В работе Murakawa et al. [176] были получены профили линий излучения молекулы ^{12}CO в полосе $\nu = 2-0$ в ближнем инфракрасном диапазоне. Линии излучения ^{12}CO в полосе $\nu = 2-0$ формируются в истечении или околозвездном диске в относительно плотном газе ($> 10^{10} \text{ см}^{-3}$) при температурах 2000–5000 К (см., например, [177, 178]). Из-за движения вещества в диске или истечении профиль этих линий может быть двугорбым. Профиль линий ^{12}CO в направлении V645 Cyg не двугорбый, но он не смещен в красную или голубую сторону. Авторы работы [176] сделали вывод, что излучение V645 Cyg в линиях ^{12}CO $\nu = 2-0$ образуется в диске, который наклонен «плашмя». В результате моделирования профиля этих линий ими была получена оценка наклона диска 10_{-10}^{+25} градусов, внутренней – $3.2_{-2.8}^{+0.7}$ а.е. – и внешней – 44 а.е. – границ диска. Полученная таким образом оценка внешней границы диска соответствует внешней границе области излучения в линиях молекулы ^{12}CO в полосе $\nu = 2-0$, за пределами которой плотность становится $< 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и/или температура падает ниже 2000 К. Так как мазеры метанола II класса формируются при плотности $< 10^8 \text{ см}^{-3}$ можно предположить, что область формирования мазеров метанола в V645 Cyg, если они образуются в диске, находится на расстояниях от центра диска > 50 а.е.

Таким образом, в целом, гипотеза Слыша и др. [173] о формировании мазеров метанола и воды в диске соответствует данным наблюдений других авторов. Основное отличие в том, что в модели Слыша и др. диск виден с ребра, тогда как согласно другим различным данным диск ориентирован «плашмя». Кроме того, в модели Слыша и др. центр диска совпадает с положением мазеров воды, которые располагаются компактной группой, и лучевая скорость движения диска как целого совпадает с лучевой скоростью мазеров воды. Это означает, что лучевая скорость движения диска относительно местного стандарта покоя (LSR), согласно их модели, составляет порядка $V_{\text{LSR}} = -50 \text{ км с}^{-1}$ и существенно отличается от системной скорости движения родительского молекулярного облака $V_{\text{LSR}} = -43.5 \text{ км с}^{-1}$, оценка которой дана в работе [179].

На основе всех имеющихся данных наблюдений можно предположить, что мазерное излучение метанола образуется в диске, который ориентирован «плашмя» или почти «плашмя». Если предположить, что мазеры образуются на расстоянии $r > 50$ а.е. от центра диска, диск вращается по закону Кеплера вокруг звезды массой $M = 10 M_{\odot}$ (что примерно соответствует В1–В2 звезде, см., например, Любимков и др. [180]), то максимальный разброс между скоростями компонент мазерной линии может составлять $2\sqrt{GM/r} \sin i = 26.6 \sin i$

км с⁻¹, где i – угол наклона диска, G – гравитационная постоянная. Для $i = 10^\circ$ максимальный разброс составляет 4.6 км с⁻¹. Эта оценка хорошо соответствует наблюдаемому разбросу 3 км с⁻¹. Мазерные линии воды образуются в истечении. При этом наблюдаются только мазеры воды, которые образуются в приближающейся к наблюдателю части истечения.

3.3.2 Возможные причины переменности мазеров метанола II класса

Поток излучения в мазерной линии на 6.7 ГГц коррелирует с оптическим блеском V645 Cyg на временах порядка полугода. Таким образом, можно предположить, что причина переменности мазеров и оптического блеска на этих временах одна и та же.

По вариациям блеска в фильтрах V и R, ΔV и ΔR , можно сделать вывод, что переменность не является следствием затмений центрального объекта окружающим веществом от наблюдателя или областей формирования мазеров. Это можно видеть из зависимости вариаций блеска в фильтре V, ΔV , от величины $\Delta V - \Delta R$, представленной на рис. 3.5. Эта зависимость по сути представляет собой диаграмму звездная величина–показатель цвета. Как видно на рис. 3.5, наиболее интенсивные вариации звездной величины не соответствуют изменению блеска за счет поглощения.

Другой причиной переменности в мазерных линиях может быть наличие ударных волн в диске, которые могут приводить к изменениям физических условий в области формирования мазеров или в областях диска, влияющих на накачку мазеров. Однако наличием ударных волн сложно объяснить синхронизацию вариаций плотности потока излучения мазерных компонент на различных скоростях. Как следует из данных наблюдений Слыша и др. расстояние между мазерными пятнами может составлять порядка сотен а.е. Для преодоления таких расстояний ударной волной, движущейся со скоростью порядка 10 км/с, необходимо порядка сотен лет. Можно предположить, что ударная волна, распространяющаяся по диску, который виден «плашмя», должна быть видна в оптическом диапазоне постоянно и не может затмевать от наблюдателя центральную звезду. Таким образом, наличием ударной волны в диске сложно объяснить и вариации блеска и оптическом диапазоне.

Можно предположить, что более вероятной причиной переменности V645 Cyg в оптическом диапазоне и в мазерной линии на 6.7 ГГц на време-

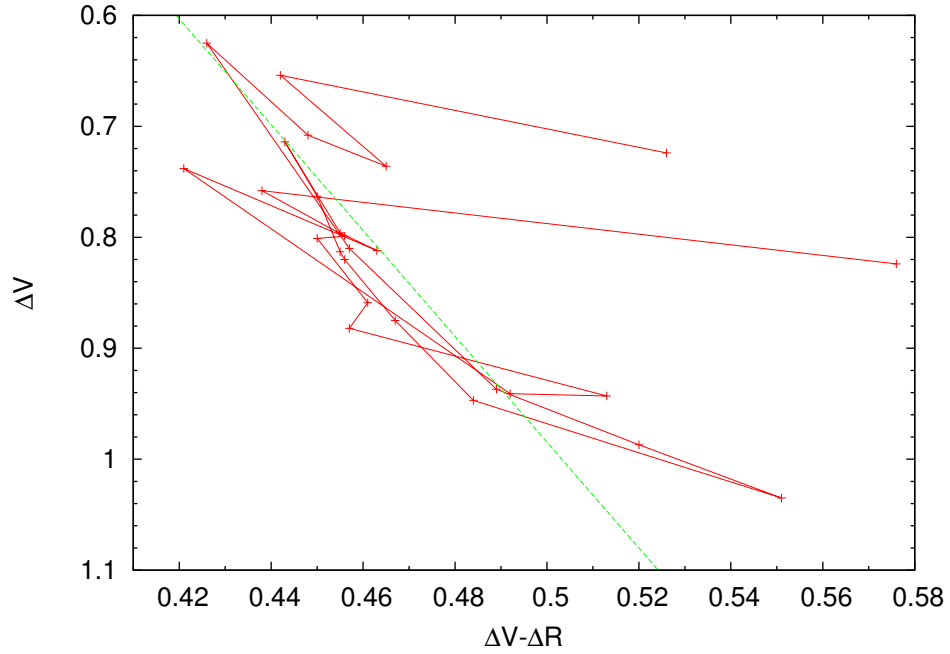


Рисунок 3.5: Зависимость вариаций блеска V645 Cyg в фильтре V, ΔV , от величины $\Delta V - \Delta R$ (сплошная красная линия с крестиками). Зеленая штриховая линия показывает вектор поглощения, полученный из закона покраснения из работы Cardelli et al. [181]. Результат представлен на конференции [B3]. Данный результат на защиту не выносится.

нах порядка полугода является переменность светимости центральной звезды. Вариации светимости могут быть связаны с вариациями темпа аккреции. О переменности темпа аккреции могут свидетельствовать вариации темпа истечения, предположение о которых было сделано в работах Eisner et al. [182] и Clarke et al. [156] по изменениям профиля линии Br γ и интенсивности излучения в инфракрасных линиях ^{12}CO . Как было показано в главе 2, вариации интенсивности подсветки диска центральным источником могут приводить к переменности мазеров, формирующихся в диске. Также переменность мазеров может быть связана с вариациями фонового излучения, которое усиливается мазерами. Как было отмечено в разделе 3.1, в направлении на V645 Cyg наблюдается излучение в радиоконтинууме, которое изменяется с течением времени. Сами вариации радиоконтинуума могут быть связаны с переменностью темпа аккреции либо с переменностью светимости центральной звезды.

Гипотеза о том, что причиной оптической и мазерной переменности являются вариации темпа аккреции на звезду, может быть проверена с помощью спектроскопических наблюдений высокого разрешения в оптическом диапазоне. Мирошниченко и др. [19] отметили, что не наблюдают признаков вещества, ак-

крецирующего на звезду. Это может быть связано с тем, что их наблюдения были проведены в момент с минимальным темпом аккреции. Вариации темпа аккреции могут проявляться в профилях эмиссионных линий, в частности Бальмеровских линий водорода. Таким образом, для дальнейших исследований переменности мазеров метанола в V645 Cyg, важную роль может сыграть спектроскопический мониторинг в оптическом диапазоне с высоким спектральным разрешением.

3.4 Заключение

В результате мониторинга V645 Cyg было получено, что данный объект демонстрирует переменность в фильтрах V и R и в мазерной линии метанола на 6.7 ГГц. Поток излучения в мазерной линии коррелирует с оптическим блеском V645 Cyg на временах порядка полугода. Увеличение и уменьшение потока в мазерной линии соответствуют увеличению и уменьшению блеска в оптическом диапазоне в ближайшую дату. Переменность блеска в оптическом диапазоне и плотности потока излучения в мазерной линии, по всей видимости, не связана с затмениями центральной звезды окружающим веществом или наличием ударных волн в диске, окружающем центральную звезду.

Заключение

Основные результаты проведенных исследований таковы:

- 1) Плотности потоков излучения метанола в протопланетном диске вокруг звезды типа Т Тельца, полученные в ЛТР приближении, существенно отличаются от плотностей потоков, полученных с учетом отклонений от ЛТР. Отношение наиболее интенсивных линий метанола чувствительно к физическим условиям в диске. Излучение метанола в диске может быть обнаружено при наблюдениях на ALMA в течение трех часов. В рассмотренной модели диска вокруг звезды типа Т Тельца не образуется мазеров метанола в (суб-)мм диапазоне длин волн.
- 2) Оптическая толщина мазерных переходов в модели аккреционного диска вокруг массивной двойной звезды значительно изменяется во время покрытия массивного компонента горячим газом за вращающейся спиралевидной ударной волной, которая находится в центральной области диска. Величина изменения оптической толщины во время покрытия зависит от вязкости диска, а также от места формирования мазеров в диске. Во время покрытия мазерное усиление в некоторых мазерных переходах может сменяться поглощением.
- 3) V645 Cyg демонстрирует переменность в фильтрах V и R и в мазерной линии метанола на 6.7 ГГц. Поток излучения в мазерной линии коррелирует с оптическим блеском V645 Cyg на временах порядка полугода. Увеличение и уменьшение потока в мазерной линии соответствуют увеличению и уменьшению блеска в оптическом диапазоне в ближайшую дату. *Данный результат на защиту не выносится.*

В дальнейшем соискателем планируется применить отработанную методику расчета переноса излучения в линиях метанола для оценки плотности потоков излучения метанола на основе моделей диска с распределениями температуры,

плотности вещества и обилия метанола, которые существенно отличаются от рассмотренных в данной работе. В частности, планируется получить оценки потока излучения на основе модели диска вокруг TW Гидры, который является более плотным и компактным по сравнению с диском вокруг DM Тельца, модель которого была рассмотрена в данной работе.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность:

- Научному руководителю А.М. Соболеву за неоценимую поддержку, руководство и наставления во время подготовки диссертации, статей и докладов.
- Всем сотрудникам Коуровской астрономической обсерватории и преподавателям Кафедры астрономии и геодезии за поддержку, обучение и ценные научные дискуссии.
- Д.А. Семенову – за предоставление моделей протопланетного диска, а также за помощь в написании статьи [A1].
- С.Ю. Горде – за предоставление данных фотометрического мониторинга объекта V645 Cyg.
- М. Щымчаку и его группе – за предоставление данных мониторинга объекта V645 Cyg в радиодиапазоне.

Список рисунков

1.1	Обилие и поверхностная плотность метанола в модели диска вокруг DM Тельца.	20
1.2	Положения точек в сетке LIME.	25
1.3	Карты излучения в линии $\text{CH}_3\text{OH } 6_0 - 5_0 A^+$ (290.111 ГГц) в различных спектральных каналах.	27
1.4	ЛТР и не-ЛТР плотности потоков излучения.	29
1.5	Разность и отношение спектров для схем уровней $v_t = 2$ и $v_t = 0$	31
1.6	Разность и отношение спектров для схем уровней $v_t = 0$ и LAMDA.	32
1.7	Отношение коэффициентов Эйнштейна.	33
1.8	Спектр метанола для «турбулентной» модели диска.	35
1.9	Карты проинтегрированного по скорости излучения.	37
1.10	Синтетические наблюдения диска при увеличенной поверхностной яркости излучения метанола.	40
1.11	Синтетические наблюдения диска для других размеров пикселя.	42

1.12	Синтетические наблюдения диска вокруг TW Гидры.	43
2.1	Схематический вид моделей аккреционного диска вокруг массивной двойной.	51
2.2	Схематический вид конфигурации двойной протозвезды и спиральных ударных волн в центральной области диска.	52
2.3	Распределение плотности водорода в области формирования мазеров.	57
2.4	Распределение температуры газа в области формирования мазеров.	58
2.5	Распределение температуры силикатовых пылинок в области формирования мазеров.	59
2.6	Распределение температуры графитовых пылинок в области формирования мазеров.	60
2.7	Удельная лучевая концентранция метанола.	62
2.8	Оптические толщины для моделей диска с $\alpha = 0.00008$	63
2.9	То же самое, что и на рис. 2.8, но в модели диска, рассчитанной для $\alpha = 0.05$	64
3.1	Данные мониторинга V645 Cyg в оптическом диапазоне и в мазерной линии на 6.7 ГГц на $V_{\text{LSR}} = -40.81 \text{ км с}^{-1}$	72
3.2	То же самое, что и на рисунке 3.1, но для компоненты мазерной линии на $V_{\text{LSR}} = -42.65 \text{ км с}^{-1}$	73
3.3	То же самое, что и на рисунке 3.1, но для компоненты мазерной линии на $V_{\text{LSR}} = -43.18 \text{ км с}^{-1}$	74
3.4	То же самое, что и на рисунке 3.1, но для компоненты мазерной линии на $V_{\text{LSR}} = -43.62 \text{ км с}^{-1}$	75
3.5	Зависимость вариаций блеска V645 Cyg в фильтре V от величины $\Delta V - \Delta R$	78
A.1	Разность спектров, рассчитанных для разных параметров сетки LIME.	108
A.2	Отношение спектров, рассчитанных для разных параметров сетки LIME.	109

Список таблиц

1.1	Начальный хим. состав при расчетах хим. эволюции диска в работе SW11.	18
1.2	Минимальные и максимальные значения физических и химических параметров диска в моделях SW11.	21
1.3	Список 10 наиболее ярких линий метанола в диске вокруг DM Тельца.	34

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

A1. **Parfenov S.Yu.**, Semenov D.A., Sobolev A.M., Gray M.D. Towards detecting methanol emission in low-mass protoplanetary discs with ALMA: The role of non-LTE excitation // MNRAS– 2016. – Vol. 460, 3. – P. 2648-2663.

A2. **Parfenov S.Yu.**, Sobolev A.M. On the Class II methanol maser periodic variability due to the rotating spiral shocks in the gaps of discs around young binary stars // MNRAS– 2014. – Vol. 444, 1. – P. 620-628.

Другие публикации автора по теме диссертации

B1. **Парфенов С.Ю.**, Соболев А.М. О периодической переменности мазеров метанола II класса // Физика Космоса: Тр. 43-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3 – 7 февр. 2014 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – С. 205.

B2. **Parfenov S.Yu.**, Sobolev A.M. On the Class II Methanol Maser Periodic Variability due to the Rotating Spiral Shocks in the Gaps of Disks Around Young Binary Stars // Star formation across space and time, ESA/ESTEC, 11-14 november 2014, Noordwijk, The Netherlands. http://herschel.esac.esa.int/SFaxz2014/Posters/115_ParfenovS.pdf

B3. **Парфенов С.Ю.**, Горда С.Ю., Szymczak M., Соболев А.М. Исследование переменности источника V645 Cyg в оптике и мазерной линии метанола на 6.7 ГГц // Физика Космоса: Тр. 44-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2 – 6 февр. 2015 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – С. 189.

В4. **Парфенов С.Ю.**, Семенов Д.А., Соболев А.М. На пути к регистрации излучения СНЗОН в маломассивных протопланетных дисках на ALMA: роль не-ЛТР возбуждения // Физика Космоса: Тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 1 – 5 февр. 2016 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – С. 205.

Список библиографических ССЫЛОК

1. *Elsila J. E., Glavin D. P., Dworkin J. P.* Cometary glycine detected in samples returned by Stardust // *Meteoritics and Planetary Science*. — 2009. — Vol. 44. — P. 1323–1330.
2. *Caselli P., Ceccarelli C.* Our astrochemical heritage // *A&A Rev.* — 2012. — Vol. 20. — P. 56. 1210.6368.
3. *Henning T., Semenov D.* Chemistry in Protoplanetary Disks // *Chemical Reviews*. — 2013. — Vol. 113. — P. 9016–9042. 1310.3151.
4. *Pontoppidan K. M., Salyk C., Bergin E. A. et al.* Volatiles in Protoplanetary Disks // *Protostars and Planets VI*. — 2014. — P. 363–385. 1401.2423.
5. *Walsh C., Millar T. J., Nomura H. et al.* Complex organic molecules in protoplanetary disks // *A&A*. — 2014. — Vol. 563. — P. A33. 1403.0390.
6. *Charnley S. B., Tielens A. G. G. M., Millar T. J.* On the molecular complexity of the hot cores in Orion A - Grain surface chemistry as 'The last refuge of the scoundrel' // *ApJ*. — 1992. — Vol. 399. — P. L71–L74.
7. *Bennett C. J., Chen S.-H., Sun B.-J. et al.* Mechanistical Studies on the Irradiation of Methanol in Extraterrestrial Ices // *ApJ*. — 2007. — Vol. 660. — P. 1588–1608.
8. *Öberg K. I., Garrod R. T., van Dishoeck E. F., Linnartz H.* Formation rates of complex organics in UV irradiated CH₃OH-rich ices. I. Experiments // *A&A*. — 2009. — Vol. 504. — P. 891–913. 0908.1169.

9. *Bacmann A., Taquet V., Faure A. et al.* Detection of complex organic molecules in a prestellar core: a new challenge for astrochemical models // *A&A.* — 2012. — Vol. 541. — P. L12.
10. *Bartkiewicz A., van Langevelde H. J.* Masers in star forming regions // *Cosmic Masers - from OH to H0* / Ed. by R. S. Booth, W. H. T. Vlemmings, E. M. L. Humphreys: IAU Symposium. — Vol. 287. — 2012. — P. 117–126. 1204.1059.
11. *Sanna A., Surcis G., Moscadelli L. et al.* Velocity and magnetic fields within 1000 AU of a massive YSO // *A&A.* — 2015. — Vol. 583. — P. L3. 1509.05428.
12. *Norris R. P., Byleveld S. E., Diamond P. J. et al.* Methanol Masers as Tracers of Circumstellar Disks // *ApJ.* — 1998. — Vol. 508. — P. 275–285. astro-ph/9806284.
13. *Niezurawska A., Szymczak M., Hrynek G., Kus A. J.* Statistics of the 6.7 GHz methanol maser variability from the Toruń survey // *Cosmic Masers: From Proto-Stars to Black Holes* / Ed. by V. Migenes, M. J. Reid: IAU Symposium. — Vol. 206. — 2002. — P. 135.
14. *Goedhart S., Gaylard M. J., Walt D. J.* Long-Term Monitoring of 6.7- and 12.2-GHz Methanol Masers // *Ap&SS.* — 2005. — Vol. 295. — P. 197–202.
15. *van der Walt D. J.* On the Methanol Masers in G9.62+0.20E and G188.95+0.89 // *AJ.* — 2011. — Vol. 141. — P. 152. 1102.3966.
16. *Araya E. D., Hofner P., Goss W. M. et al.* Quasi-periodic Formaldehyde Maser Flares in the Massive Protostellar Object IRAS 18566+0408 // *ApJ.* — 2010. — Vol. 717. — P. L133–L137. 1006.2164.
17. *Inayoshi K., Sugiyama K., Hosokawa T. et al.* Direct Diagnostics of Forming Massive Stars: Stellar Pulsation and Periodic Variability of Maser Sources // *ApJ.* — 2013. — Vol. 769. — P. L20. 1304.5241.
18. *Szymczak M., Wolak P., Bartkiewicz A.* Discovery of four periodic methanol masers and updated light curve for a further one // *MNRAS.* — 2015. — Vol. 448. — P. 2284–2293. 1502.03373.

19. *Miroshnichenko A. S., Hofmann K.-H., Schertl D. et al.* A new spectroscopic and interferometric study of the young stellar object V645 Cygni // *A&A.* — 2009. — Vol. 498. — P. 115–126. 0904.1822.
20. *Vasyunin A. I., Semenov D., Henning T. et al.* Chemistry in Protoplanetary Disks: A Sensitivity Analysis // *ApJ.* — 2008. — Vol. 672. — P. 629–641. 0709.3323.
21. *Semenov D., Wiebe D.* Chemical Evolution of Turbulent Protoplanetary Disks and the Solar Nebula // *ApJS.* — 2011. — Vol. 196. — P. 25. 1104.4358.
22. *Rabli D., Flower D. R.* The rotational excitation of methanol by molecular hydrogen // *MNRAS.* — 2010. — Vol. 406. — P. 95–101.
23. *McMullin J. P., Waters B., Schiebel D. et al.* CASA Architecture and Applications // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI* / Ed. by R. A. Shaw, F. Hill, D. J. Bell: Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — Vol. 376. — 2007. — P. 127.
24. *Cragg D. M., Sobolev A. M., Godfrey P. D.* Models of class II methanol masers based on improved molecular data // *MNRAS.* — 2005. — Vol. 360. — P. 533–545. astro-ph/0504194.
25. *Ferland G. J., Porter R. L., van Hoof P. A. M. et al.* The 2013 Release of Cloudy // *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* — 2013. — Vol. 49. — P. 137–163. 1302.4485.
26. *Bergin E. A.* The Chemical Evolution of Protoplanetary Disks // *Physical Processes in Circumstellar Disks around Young Stars* / Ed. by P. J. V. Garcia. — 2011. — P. 55–113.
27. *Dutrey A., Semenov D., Chapillon E. et al.* Physical and Chemical Structure of Planet-Forming Disks Probed by Millimeter Observations and Modeling // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 317–338. 1402.3503.
28. *Öberg K. I., Lauck T., Graninger D.* Complex Organic Molecules during Low-mass Star Formation: Pilot Survey Results // *ApJ.* — 2014. — Vol. 788. — P. 68. 1406.1542.

29. *Garrod R. T., Weaver S. L. W., Herbst E.* Complex Chemistry in Star-forming Regions: An Expanded Gas-Grain Warm-up Chemical Model // *ApJ*. — 2008. — Vol. 682. — P. 283–302. 0803.1214.
30. *Leger A., Jura M., Omont A.* Desorption from interstellar grains // *A&A*. — 1985. — Vol. 144. — P. 147–160.
31. *Garrod R. T., Wakelam V., Herbst E.* Non-thermal desorption from interstellar dust grains via exothermic surface reactions // *A&A*. — 2007. — Vol. 467. — P. 1103–1115. astro-ph/0703188.
32. *Ehrenfreund P., Charnley S. B.* Organic Molecules in the Interstellar Medium, Comets, and Meteorites: A Voyage from Dark Clouds to the Early Earth // *ARA&A*. — 2000. — Vol. 38. — P. 427–483.
33. *Busemann H., Young A. F., O'D. Alexander C. M. et al.* Interstellar Chemistry Recorded in Organic Matter from Primitive Meteorites // *Science*. — 2006. — Vol. 312. — P. 727–730.
34. *Pizzarello S., Cooper G. W., Flynn G. J.* The Nature and Distribution of the Organic Material in Carbonaceous Chondrites and Interplanetary Dust Particles // *Meteorites and the Early Solar System II* / Ed. by D. S. Lauretta, H. Y. McSween. — 2006. — P. 625–651.
35. *Herbst E., van Dishoeck E. F.* Complex Organic Interstellar Molecules // *ARA&A*. — 2009. — Vol. 47. — P. 427–480.
36. *Snyder L. E.* Interstellar Chemistry Special Feature: Interferometric observations of large biologically interesting interstellar and cometary molecules // *Proceedings of the National Academy of Science*. — 2006. — Vol. 103. — P. 12243–12248.
37. *Watanabe Y., Sakai N., López-Sepulcre A. et al.* Spectral Line Survey toward the Young Massive Protostar NGC 2264 CMM3 in the 4 mm, 3 mm, and 0.8 mm Bands // *ApJ*. — 2015. — Vol. 809. — P. 162. 1507.04958.
38. *Crockett N. R., Bergin E. A., Neill J. L. et al.* Herschel Observations of Extraordinary Sources: Analysis of the HIFI 1.2 THz Wide Spectral Survey toward Orion KL II. Chemical Implications // *ApJ*. — 2015. — Vol. 806. — P. 239. 1506.03875.

39. *Kalinina N. D., Sobolev A. M., Kalenskii S. V.* Spectral survey of molecular cores NGC 6334I and NGC 6334I(N) in the range 80.5-242.0 GHz // *New Asrto.* — 2010. — Vol. 15. — P. 590–608.
40. *Kaifu N., Ohishi M., Kawaguchi K. et al.* A 8.8–50GHz Complete Spectral Line Survey toward TMC-1 I. Survey Data // *PASJ.* — 2004. — Vol. 56. — P. 69–173.
41. *Aikawa Y., Momose M., Thi W.-F. et al.* Interferometric Observations of Formaldehyde in the Protoplanetary Disk around LkCa 15 // *PASJ.* — 2003. — Vol. 55. — P. 11–15. astro-ph/0211440.
42. *Chapillon E., Dutrey A., Guilloteau S. et al.* Chemistry in Disks. VII. First Detection of HC₃N in Protoplanetary Disks // *ApJ.* — 2012. — Vol. 756. — P. 58. 1207.2682.
43. *Qi C., Öberg K. I., Wilner D. J.* H₂CO and N₂H⁺ in Protoplanetary Disks: Evidence for a CO-ice Regulated Chemistry // *ApJ.* — 2013. — Vol. 765. — P. 34. 1301.2465.
44. *Qi C., Öberg K. I., Wilner D. J., Rosenfeld K. A.* First Detection of c-C₃H₂ in a Circumstellar Disk // *ApJ.* — 2013. — Vol. 765. — P. L14. 1302.0251.
45. *Öberg K. I., Guzmán V. V., Furuya K. et al.* The comet-like composition of a protoplanetary disk as revealed by complex cyanides // *Nature.* — 2015. — Vol. 520. — P. 198–201. 1505.06347.
46. *Carr J. S., Najita J. R.* Organic Molecules and Water in the Planet Formation Region of Young Circumstellar Disks // *Science.* — 2008. — Vol. 319. — P. 1504.
47. *Salyk C., Pontoppidan K. M., Blake G. A. et al.* H₂O and OH Gas in the Terrestrial Planet-forming Zones of Protoplanetary Disks // *ApJ.* — 2008. — Vol. 676. — P. L49–L52. 0802.0037.
48. *Pascucci I., Apai D., Luhman K. et al.* The Different Evolution of Gas and Dust in Disks around Sun-Like and Cool Stars // *ApJ.* — 2009. — Vol. 696. — P. 143–159. 0810.2552.
49. *Pontoppidan K. M., Salyk C., Blake G. A., Käuft H. U.* Spectrally Resolved Pure Rotational Lines of Water in Protoplanetary Disks // *ApJ.* — 2010. — Vol. 722. — P. L173–L177. 1009.3259.

50. *Carr J. S., Najita J. R.* Organic Molecules and Water in the Inner Disks of T Tauri Stars // *ApJ*. — 2011. — Vol. 733. — P. 102. 1104.0184.
51. *Salyk C., Pontoppidan K. M., Blake G. A. et al.* A Spitzer Survey of Mid-infrared Molecular Emission from Protoplanetary Disks. II. Correlations and Local Thermal Equilibrium Models // *ApJ*. — 2011. — Vol. 731. — P. 130. 1104.0948.
52. *Mandell A. M., Bast J., van Dishoeck E. F. et al.* First Detection of Near-infrared Line Emission from Organics in Young Circumstellar Disks // *ApJ*. — 2012. — Vol. 747. — P. 92. 1201.0766.
53. *van der Marel N., van Dishoeck E. F., Bruderer S., van Kempen T. A.* Warm formaldehyde in the Ophiuchus IRS 48 transitional disk // *A&A*. — 2014. — Vol. 563. — P. A113. 1402.0392.
54. *Bruderer S., van der Marel N., van Dishoeck E. F., van Kempen T. A.* Gas structure inside dust cavities of transition disks: Ophiuchus IRS 48 observed by ALMA // *A&A*. — 2014. — Vol. 562. — P. A26. 1312.2756.
55. *D'Alessio P., Calvet N., Hartmann L. et al.* Accretion Disks around Young Objects. II. Tests of Well-mixed Models with ISM Dust // *ApJ*. — 1999. — Vol. 527. — P. 893–909. astro-ph/9907330.
56. *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Black holes in binary systems. Observational appearance. // *A&A*. — 1973. — Vol. 24. — P. 337–355.
57. *Andrews S. M., Williams J. P.* High-Resolution Submillimeter Constraints on Circumstellar Disk Structure // *ApJ*. — 2007. — Vol. 659. — P. 705–728. astro-ph/0610813.
58. *Guilloteau S., Dutrey A., Piétu V., Boehler Y.* A dual-frequency sub-arcsecond study of proto-planetary disks at mm wavelengths: first evidence for radial variations of the dust properties // *A&A*. — 2011. — Vol. 529. — P. A105. 1103.1296.
59. *Flock M., Dzyurkevich N., Klahr H. et al.* Turbulence and Steady Flows in Three-dimensional Global Stratified Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Disks // *ApJ*. — 2011. — Vol. 735. — P. 122. 1104.4565.

60. *Gammie C. F.* Layered Accretion in T Tauri Disks // ApJ. — 1996. — Vol. 457. — P. 355.
61. *Mazzitelli I.* A critical evaluation of pre-main sequence evolutionary tracks. // European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings / Ed. by B. Reipurth: European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings. — Vol. 33. — 1989. — P. 433–445.
62. *Simon M., Dutrey A., Guilloteau S.* Dynamical Masses of T Tauri Stars and Calibration of Pre-Main-Sequence Evolution // ApJ. — 2000. — Vol. 545. — P. 1034–1043. astro-ph/0008370.
63. *Draine B. T.* Photoelectric heating of interstellar gas // ApJS. — 1978. — Vol. 36. — P. 595–619.
64. *Bergin E., Calvet N., D'Alessio P., Herczeg G. J.* The Effects of UV Continuum and Ly α Radiation on the Chemical Equilibrium of T Tauri Disks // ApJ. — 2003. — Vol. 591. — P. L159–L162. astro-ph/0305565.
65. *Calvet N., D'Alessio P., Watson D. M. et al.* Disks in Transition in the Taurus Population: Spitzer IRS Spectra of GM Aurigae and DM Tauri // ApJ. — 2005. — Vol. 630. — P. L185–L188.
66. *Andrews S. M., Wilner D. J., Espaillat C. et al.* Resolved Images of Large Cavities in Protoplanetary Transition Disks // ApJ. — 2011. — Vol. 732. — P. 42. 1103.0284.
67. *Gräfe C., Wolf S., Guilloteau S. et al.* Vertical settling and radial segregation of large dust grains in the circumstellar disk of the Butterfly Star // A&A. — 2013. — Vol. 553. — P. A69. 1303.6499.
68. *Biham O., Furman I., Pirronello V., Vidali G.* Master Equation for Hydrogen Recombination on Grain Surfaces // ApJ. — 2001. — Vol. 553. — P. 595–603. astro-ph/0012267.
69. *Semenov D., Hersant F., Wakelam V. et al.* Chemistry in disks. IV. Benchmarking gas-grain chemical models with surface reactions // A&A. — 2010. — Vol. 522. — P. A42. 1007.2302.
70. *van Dishoeck E. F., Jonkheid B., van Hemert M. C.* Photoprocesses in protoplanetary disks // Faraday Discussions. — 2006. — Vol. 133. — P. 231.

71. *Draine B. T., Bertoldi F.* Structure of Stationary Photodissociation Fronts // *ApJ.* — 1996. — Vol. 468. — P. 269. astro-ph/9603032.
72. *Lee H.-H., Herbst E., Pineau des Forets G. et al.* Photodissociation of H₂ and CO and time dependent chemistry in inhomogeneous interstellar clouds. // *A&A.* — 1996. — Vol. 311. — P. 690–707.
73. *Semenov D., Wiebe D., Henning T.* Reduction of chemical networks. II. Analysis of the fractional ionisation in protoplanetary discs // *A&A.* — 2004. — Vol. 417. — P. 93–106. astro-ph/0403555.
74. *Finocchi F., Gail H.-P., Duschl W. J.* Chemical reactions in protoplanetary accretion disks. II. Carbon dust oxidation. // *A&A.* — 1997. — Vol. 325. — P. 1264–1279.
75. *Glassgold A. E., Najita J., Igea J.* X-Ray Ionization of Protoplanetary Disks // *ApJ.* — 1997. — Vol. 480. — P. 344–350.
76. *Glassgold A. E., Najita J., Igea J.* X-Ray Ionization of Protoplanetary Disks: Erratum // *ApJ.* — 1997. — Vol. 485. — P. 920.
77. *Öberg K. I., Fuchs G. W., Awad Z. et al.* Photodesorption of CO Ice // *ApJ.* — 2007. — Vol. 662. — P. L23–L26.
78. *Öberg K. I., van Dishoeck E. F., Linnartz H.* Photodesorption of ices I: CO, N₂, and CO₂ // *A&A.* — 2009. — Vol. 496. — P. 281–293. 0809.1333.
79. *Öberg K. I., Linnartz H., Visser R., van Dishoeck E. F.* Photodesorption of Ices. II. H₂O and D₂O // *ApJ.* — 2009. — Vol. 693. — P. 1209–1218. 0812.1918.
80. *Fayolle E. C., Bertin M., Romanzin C. et al.* CO Ice Photodesorption: A Wavelength-dependent Study // *ApJ.* — 2011. — Vol. 739. — P. L36. 1109.0281.
81. *Garrod R. T., Herbst E.* Formation of methyl formate and other organic species in the warm-up phase of hot molecular cores // *A&A.* — 2006. — Vol. 457. — P. 927–936. astro-ph/0607560.
82. *Lee H.-H., Roueff E., Pineau des Forets G. et al.* Bistability in large chemical networks: a global view // *A&A.* — 1998. — Vol. 334. — P. 1047–1055.

83. *Ilgner M., Henning T., Markwick A. J., Millar T. J.* Transport processes and chemical evolution in steady accretion disk flows // A&A. — 2004. — Vol. 415. — P. 643–659.
84. *Willacy K., Langer W., Allen M., Bryden G.* Turbulence-driven Diffusion in Protoplanetary Disks: Chemical Effects in the Outer Regions // ApJ. — 2006. — Vol. 644. — P. 1202–1213. astro-ph/0603103.
85. *Heinzeller D., Nomura H., Walsh C., Millar T. J.* Chemical Evolution of Protoplanetary Disks - The Effects of Viscous Accretion, Turbulent Mixing, and Disk Winds // ApJ. — 2011. — Vol. 731. — P. 115. 1102.3972.
86. *Furuya K., Aikawa Y., Nomura H. et al.* Water in Protoplanetary Disks: Deuteration and Turbulent Mixing // ApJ. — 2013. — Vol. 779. — P. 11. 1310.3342.
87. *Sobolev A. M., Deguchi S.* Pumping of Class 2 methanol masers. 1: The $2_0 - 3_{-1}E$ transition // A&A. — 1994. — Vol. 291. — P. 569–576.
88. *Mekhtiev M. A., Godfrey P. D., Hougen J. T.* Linestrengths of Torsion-Rotation Transitions of Methanol for $J \leq 22$, $K \leq 14$, and $v_t = 2$ from Hamiltonian-Based Calculations // Journal of Molecular Spectroscopy. — 1999. — Vol. 194. — P. 171–178.
89. *Schöier F. L., van der Tak F. F. S., van Dishoeck E. F., Black J. H.* An atomic and molecular database for analysis of submillimetre line observations // A&A. — 2005. — Vol. 432. — P. 369–379. astro-ph/0411110.
90. *Brinch C., Hogerheijde M. R.* LIME - a flexible, non-LTE line excitation and radiation transfer method for millimeter and far-infrared wavelengths // A&A. — 2010. — Vol. 523. — P. A25. 1008.1492.
91. *Douglas T. A., Caselli P., Ilee J. D. et al.* Simulated observations of young gravitationally unstable protoplanetary discs // MNRAS. — 2013. — Vol. 433. — P. 2064–2074. 1305.3777.
92. *Guilloteau S., Dutrey A., Wakelam V. et al.* Chemistry in disks. VIII. The CS molecule as an analytic tracer of turbulence in disks // A&A. — 2012. — Vol. 548. — P. A70. 1211.4969.

93. *de Gregorio-Monsalvo I., Ménard F., Dent W. et al.* Unveiling the gas-and-dust disk structure in HD 163296 using ALMA observations // A&A. — 2013. — Vol. 557. — P. A133. 1307.1357.
94. *Ossenkopf V., Henning T.* Dust opacities for protostellar cores // A&A. — 1994. — Vol. 291. — P. 943–959.
95. *Pickett H. M., Poynter R. L., Cohen E. A. et al.* Submillimeter, millimeter and microwave spectral line catalog. // J. Quant. Spec. Radiat. Transf.. — 1998. — Vol. 60. — P. 883–890.
96. *Müller H. S. P., Thorwirth S., Roth D. A., Winnewisser G.* The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS // A&A. — 2001. — Vol. 370. — P. L49–L52.
97. *Müller H. S. P., Schlöder F., Stutzki J., Winnewisser G.* The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS: a useful tool for astronomers and spectroscopists // Journal of Molecular Structure. — 2005. — Vol. 742. — P. 215–227.
98. *Pety J., Gueth F., Guilloteau S.* Simulating the wide-field imaging capabilities of ALMA // SF2A-2001: Semaine de l’Astrophysique Française / Ed. by F. Combes, D. Barret, F. Thévenin. — 2001. — P. 569.
99. *Andrews S. M., Wilner D. J., Hughes A. M. et al.* The TW Hya Disk at 870 μm : Comparison of CO and Dust Radial Structures // ApJ. — 2012. — Vol. 744. — P. 162. 1111.5037.
100. *Woodall J., Agúndez M., Markwick-Kemper A. J., Millar T. J.* The UMIST database for astrochemistry 2006 // A&A. — 2007. — Vol. 466. — P. 1197–1204.
101. *Ruffle D. P., Herbst E.* New models of interstellar gas-grain chemistry - I. Surface diffusion rates // MNRAS. — 2000. — Vol. 319. — P. 837–850.
102. *Willacy K.* The Chemistry of Multiply Deuterated Molecules in Protoplanetary Disks. I. The Outer Disk // ApJ. — 2007. — Vol. 660. — P. 441–460. astro-ph/0701484.
103. *Caswell J. L.* The Methanol Multibeam Survey: a unique window on high-mass star formation in our Galaxy // IAU Symposium / Ed. by T. Wong, J. Ott: IAU Symposium. — Vol. 292. — 2013. — P. 79–82.

104. *Wilson T. L., Walmsley C. M., Jewell P. R., Snyder L. E.* Detection of a new type of methanol maser // *A&A.* — 1984. — Vol. 134. — P. L7–L10.
105. *Menten K. M., Reid M. J., Pratap P. et al.* VLBI observations of the 6.7 GHz methanol masers toward W3(OH) // *ApJ.* — 1992. — Vol. 401. — P. L39–L42.
106. *Walsh A. J., Burton M. G., Hyland A. R., Robinson G.* Studies of ultracompact HII regions - II. High-resolution radio continuum and methanol maser survey // *MNRAS.* — 1998. — Vol. 301. — P. 640–698.
107. *Slysh V. I., Kalenskii S. V., Val'tts I. E.* Methanol Radio Emission at Millimeter Wavelengths: New Masers at 1.3 and 2.8 Millimeters // *Astronomy Reports.* — 2002. — Vol. 46. — P. 49–56.
108. *Sobolev A. M., Cragg D. M., Ellingsen S. P. et al.* How do methanol masers manage to appear in the youngest star vicinities and isolated molecular clumps? // *IAU Symposium* / Ed. by J. M. Chapman, W. A. Baan: IAU Symposium. — Vol. 242. — 2007. — P. 81–88. 0706.3117.
109. *Sugiyama K., Fujisawa K., Doi A. et al.* Rotating and infalling motion around the high-mass young stellar object Cepheus A-HW2 observed with the methanol maser at 6.7 GHz // *A&A.* — 2014. — Vol. 562. — P. A82. 1312.7235.
110. *Moscadelli L., Goddi C.* A multiple system of high-mass YSOs surrounded by disks in NGC 7538 IRS1 . Gas dynamics on scales of 10-700 AU from CH₃OH maser and NH₃ thermal lines // *A&A.* — 2014. — Vol. 566. — P. A150. 1404.3957.
111. *Hollenbach D., Johnstone D., Lizano S., Shu F.* Photoevaporation of disks around massive stars and application to ultracompact H II regions // *ApJ.* — 1994. — Vol. 428. — P. 654–669.
112. *Sobolev A. M., Cragg D. M., Godfrey P. D.* Class II methanol maser candidates // *MNRAS.* — 1997. — Vol. 288. — P. L39–L43.
113. *Voronkov M., Sobolev A., Ellingsen S. et al.* Maser Action in Methanol Transitions // *Ap&SS.* — 2005. — Vol. 295. — P. 217–223. astro-ph/0407275.
114. *De Buizer J. M., Redman R. O., Longmore S. N. et al.* SiO outflow signatures toward massive young stellar objects with linearly distributed methanol masers // *A&A.* — 2009. — Vol. 493. — P. 127–143. 0810.4951.

115. *Minier V., Booth R. S., Conway J. E.* VLBI observations of 6.7 and 12.2 GHz methanol masers toward high mass star-forming regions. I. Observational results: protostellar disks or outflows? // *A&A.* — 2000. — Vol. 362. — P. 1093–1108.
116. *van der Walt D. J., Sobolev A. M., Butner H.* Inferences from the kinematic properties of 6.7 GHz methanol masers // *A&A.* — 2007. — Vol. 464. — P. 1015–1022.
117. *Edris K. A., Fuller G. A., Cohen R. J., Etoke S.* The masers towards IRAS 20126 + 4104 // *A&A.* — 2005. — Vol. 434. — P. 213–220. 1107.0448.
118. *Goedhart S., Minier V., Gaylard M. J., van der Walt D. J.* Very Long Baseline Array imaging of a periodic 12.2-GHz methanol maser flare in G9.62+0.20E // *MNRAS.* — 2005. — Vol. 356. — P. 839–848. astro-ph/0412056.
119. *Goedhart S., Maswanganye J. P., Gaylard M. J., van der Walt D. J.* Periodicity in Class II methanol masers in high-mass star-forming regions // *MNRAS.* — 2014. — Vol. 437. — P. 1808–1820. 1311.1615.
120. *Szymczak M., Wolak P., Bartkiewicz A.* 6.7 GHz methanol maser variability in Cepheus A // *MNRAS.* — 2014. — Vol. 439. — P. 407–415. 1401.7556.
121. *Torstensson K. J. E., van Langevelde H. J., Vlemmings W. H. T., Bourke S.* Dynamics of the 6.7 and 12.2 GHz methanol masers around Cepheus A HW2 // *A&A.* — 2011. — Vol. 526. — P. A38. 1010.4191.
122. *Ochi Y., Sugimoto K., Hanawa T.* Evolution of a Protobinary: Accretion Rates of the Primary and Secondary // *ApJ.* — 2005. — Vol. 623. — P. 922–939.
123. *Sytov A. Y., Kaigorodov P. V., Fateeva A. M., Bisikalo D. V.* Structure of the circumbinary envelopes of young binary stars with elliptical orbits // *Astronomy Reports.* — 2011. — Vol. 55. — P. 793–800.
124. *Gómez de Castro A. I., López-Santiago J., Talavera A. et al.* XMM-Newton Monitoring of the Close Pre-main-sequence Binary AK Sco. Evidence of Tide-driven Filling of the Inner Gap in the Circumbinary Disk // *ApJ.* — 2013. — Vol. 766. — P. 62. 1301.6966.
125. *Krumholz M. R., Klein R. I., McKee C. F. et al.* The Formation of Massive Star Systems by Accretion // *Science.* — 2009. — Vol. 323. — P. 754. 0901.3157.

126. *Sytov A. Y., Bisikalo D. V., Kaigorodov P. V., Boyarchuk A. A.* Observational manifestations of the common envelope in a close binary // *Astronomy Reports*. — 2009. — Vol. 53. — P. 428–435.
127. *Grevesse N., Sauval A. J.* Standard Solar Composition // *Space Sci. Rev.*. — 1998. — Vol. 85. — P. 161–174.
128. *Lanz T., Hubeny I.* A Grid of Non-LTE Line-blanketed Model Atmospheres of O-Type Stars // *ApJS*. — 2003. — Vol. 146. — P. 417–441. astro-ph/0210157.
129. *Castelli F., Kurucz R. L.* New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres // *ArXiv Astrophysics e-prints*. — 2004. astro-ph/0405087.
130. *Artymowicz P., Lubow S. H.* Dynamics of binary-disk interaction. 1: Resonances and disk gap sizes // *ApJ*. — 1994. — Vol. 421. — P. 651–667.
131. *Preibisch T., Ratzka T., Kuderna B. et al.* Deep wide-field near-infrared survey of the Carina Nebula // *A&A*. — 2011. — Vol. 530. — P. A34. 1104.3477.
132. *Baldwin J. A., Ferland G. J., Martin P. G. et al.* Physical conditions in the Orion Nebula and an assessment of its helium abundance // *ApJ*. — 1991. — Vol. 374. — P. 580–609.
133. *Rubin R. H., Simpson J. P., Haas M. R., Erickson E. F.* Axisymmetric model of the ionized gas in the Orion Nebula // *ApJ*. — 1991. — Vol. 374. — P. 564–579.
134. *Osterbrock D. E., Tran H. D., Veilleux S.* Faint emission lines in the spectrum of the Orion Nebula and the abundances of some of the rarer elements // *ApJ*. — 1992. — Vol. 389. — P. 305–324.
135. *Rubin R. H., Dufour R. J., Walter D. K.* Silicon and carbon abundances in the Orion nebula // *ApJ*. — 1993. — Vol. 413. — P. 242–250.
136. *van Hoof P. A. M., Weingartner J. C., Martin P. G. et al.* Grain size distributions and photoelectric heating in ionized media // *MNRAS*. — 2004. — Vol. 350. — P. 1330–1341. astro-ph/0402381.
137. *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Black holes in binary systems. Observational appearance. // *A&A*. — 1973. — Vol. 24. — P. 337–355.

138. *McClure M. K., D'Alessio P., Calvet N. et al.* Curved Walls: Grain Growth, Settling, and Composition Patterns in T Tauri Disk Dust Sublimation Fronts // *ApJ*. — 2013. — Vol. 775. — P. 114. 1308.3207.
139. *Ilee J. D., Wheelwright H. E., Oudmaijer R. D. et al.* CO bandhead emission of massive young stellar objects: determining disc properties // *MNRAS*. — 2013. — Vol. 429. — P. 2960–2973. 1212.0554.
140. *Lang K. R.* Astrophysical Formulae. A Compendium for the Physicist and Astrophysicist. — 1980. — P. 46.
141. *Nakagawa N.* Interstellar Molecules on Dust Mantles // *Interstellar Molecules* / Ed. by B. H. Andrew: IAU Symposium. — Vol. 87. — 1980. — P. 365.
142. *Green S. D., Bolina A. S., Chen R. et al.* Applying laboratory thermal desorption data in an interstellar context: sublimation of methanol thin films // *MNRAS*. — 2009. — Vol. 398. — P. 357–367.
143. *Ostrovskii A. B., Sobolev A. M.* Influence of dust parameters on class II methanol maser pumping // *Cosmic Masers: From Proto-Stars to Black Holes* / Ed. by V. Migenes, M. J. Reid: IAU Symposium. — Vol. 206. — 2002. — P. 183.
144. *Sobolev A. M., Wallin B. K., Watson W. D.* Astrophysical Maser Radiation from a Turbulent Medium: Application to 25 GHz Methanol Masers // *ApJ*. — 1998. — Vol. 498. — P. 763–772.
145. *Wallin B. K., Watson W. D., Wyld H. W.* Spectra of Maser Radiation from a Turbulent, Circumnuclear Accretion Disk // *ApJ*. — 1998. — Vol. 495. — P. 774–785.
146. *Goldberg L.* Stimulated Emission of Radio-Frequency Lines of Hydrogen // *ApJ*. — 1966. — Vol. 144. — P. 1225–1231.
147. *Goedhart S., Gaylard M. J., van der Walt D. J.* Periodic flares in the methanol maser source G9.62+0.20E // *MNRAS*. — 2003. — Vol. 339. — P. L33–L36.
148. *Goedhart S., Gaylard M. J., van der Walt D. J.* Long-term monitoring of 6.7-GHz methanol masers // *MNRAS*. — 2004. — Vol. 355. — P. 553–584.

149. *van der Walt D. J., Goedhart S., Gaylard M. J.* Periodic class II methanol masers in G9.62+0.20E // MNRAS.— 2009.— Vol. 398.— P. 961–970. 0906.0876.
150. *Hoffmeister C., Rohlfs E., Ahnert P.* Die veranderlichen Sterne der nordlichen Milchstrasse. Teil VI. // Veroeffentlichungen der Sternwarte Sonneberg.— 1951.— Vol. 1.— P. 5.
151. *Cohen M.* The nature of V645 Cygni = CRL 2789 // ApJ.— 1977.— Vol. 215.— P. 533–535.
152. *Humphreys R. M., Merrill K. M., Black J. H.* The perplexing spectrum of AFGL 2789 /V645 CYGNI/ // ApJ.— 1980.— Vol. 237.— P. L17–L20.
153. *Elia D., Strafella F., Campeggio L. et al.* Modeling the Continuum Emission from the Circumstellar Environment of Herbig Ae/Be Stars // ApJ.— 2004.— Vol. 601.— P. 1000–1012.
154. *Oh C. S., Kobayashi H., Honma M. et al.* VERA Observations of H₂O Maser Sources in Three Massive Star-Forming Regions and Galactic Rotation Measurements // PASJ.— 2010.— Vol. 62.— P. 101–114.
155. *Goodrich R. W.* V645 Cygni and the duck nebula // ApJ.— 1986.— Vol. 311.— P. 882–894.
156. *Clarke A. J., Lumsden S. L., Oudmaijer R. D. et al.* Evidence for variable outflows in the young stellar object V645 Cygni // A&A.— 2006.— Vol. 457.— P. 183–188. astro-ph/0606652.
157. *Verdes-Montenegro L., Gomez J. F., Torrelles J. M. et al.* V645 Cygni - A decelerating molecular outflow? // A&A.— 1991.— Vol. 244.— P. 84–94.
158. *Curiel S., Rodriguez L. F., Bohigas J. et al.* Extended radio continuum emission associated with V645 CYG and MWC1080 // Astrophysical Letters and Communications.— 1989.— Vol. 27.— P. 299–309.
159. *Skinner S. L., Brown A., Stewart R. T.* A high-sensitivity survey of radio continuum emission from Herbig Ae/Be stars // ApJS.— 1993.— Vol. 87.— P. 217–265.

160. *Girart J. M., Curiel S., Rodríguez L. F., Cantó J.* Radio Continuum Observations towards Optical and Molecular Outflows // *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* — 2002. — Vol. 38. — P. 169–186. astro-ph/0207018.
161. *Hamann F., Persson S. E.* High-resolution spectra of the luminous young stellar object V645 Cygni // *ApJ.* — 1989. — Vol. 339. — P. 1078–1088.
162. *Shevchenko V. S., Grankin K. N., Ibragimov M. A. et al.* Periodic phenomena in Ae/Be Herbig stars light curves. I - Light curves classification and digital analysis methods. II - Results and probable interpretation for selected stars // *Ap&SS.* — 1993. — Vol. 202. — P. 121–154.
163. *Sobolev A. M., Gorda S. Y., Davydova O. A.* Discovery of irregular variability of five stars in the vicinity of the young stellar object V645 Cygni // *Information Bulletin on Variable Stars.* — 2013. — Vol. 6061.
164. *Comoretto G., Palagi F., Cesaroni R. et al.* The Arcetri atlas of H₂O maser sources // *A&AS.* — 1990. — Vol. 84. — P. 179–225.
165. *Morris M., Kazes I.* An unusual OH maser associated with V 645 Cygni // *A&A.* — 1982. — Vol. 111. — P. 239–241.
166. *Slysh V. I., Val'tts I. E., Kalenskii S. V. et al.* The Medicina survey of methanol masers at 6.7 GHz // *A&AS.* — 1999. — Vol. 134. — P. 115–128.
167. *Szymczak M., Hrynek G., Kus A. J.* A survey of the 6.7 GHz methanol maser emission from IRAS sources. I. Data // *A&AS.* — 2000. — Vol. 143. — P. 269–301.
168. *Błaszkiwicz L., Kus A. J.* 12.2 GHz survey towards 6.7 GHz methanol masers. A comparison of 12.2 GHz and 6.7 GHz spectra // *A&A.* — 2004. — Vol. 413. — P. 233–240.
169. *Bae J.-H., Kim K.-T., Youn S.-Y. et al.* A Multi-epoch, Simultaneous Water and Methanol Maser Survey toward Intermediate-mass Young Stellar Objects // *ApJS.* — 2011. — Vol. 196. — P. 21. 1108.3878.
170. *Szymczak M., Wolak P., Bartkiewicz A., Borkowski K. M.* The Torun catalogue of 6.7 GHz methanol masers // *Astronomische Nachrichten.* — 2012. — Vol. 333. — P. 634.

171. *Szymczak M., Wolak P., Bartkiewicz A.* 6.7 GHz methanol maser variability in Cepheus A // MNRAS. — 2014. — Vol. 439. — P. 407–415. 1401.7556.
172. *Ott M., Witzel A., Quirrenbach A. et al.* An updated list of radio flux density calibrators // A&A. — 1994. — Vol. 284. — P. 331–339.
173. *Slysh V. I., Voronkov M. A., Val'tts I. E., Migenes V.* Methanol and H₂O Masers in a Disk around GL 2789 // Astronomy Reports. — 2002. — Vol. 46. — P. 969–980. astro-ph/0304181.
174. *Natta A., Palla F., Butner H. M. et al.* Infrared studies of circumstellar matter around Herbig Ae/Be and related stars // ApJ. — 1993. — Vol. 406. — P. 674–691.
175. *Miroshnichenko A., Ivezić Ž., Vinković D., Elitzur M.* Dust Emission from Herbig AE/BE Stars: Evidence for Disks and Envelopes // ApJ. — 1999. — Vol. 520. — P. L115–L118. astro-ph/9905361.
176. *Murakawa K., Lumsden S. L., Oudmaijer R. D. et al.* Near-infrared integral field spectroscopy of massive young stellar objects // MNRAS. — 2013. — Vol. 436. — P. 511–525. 1309.6139.
177. *Chandler C. J., Carlstrom J. E., Scoville N. Z.* Infrared CO Emission from Young Stars: Accretion Disks and Neutral Winds // ApJ. — 1995. — Vol. 446. — P. 793.
178. *Kraus M., Krügel E., Thum C., Geballe T. R.* CO band emission from MWC 349. I. First overtone bands from a disk or from a wind? // A&A. — 2000. — Vol. 362. — P. 158–168. astro-ph/0008213.
179. *Rodriguez L. F., Torrelles J. M., Moran J. M.* Radio continuum and carbon monoxide observations of V645 Cygni /GL 2789/ // AJ. — 1981. — Vol. 86. — P. 1245–1249.
180. *Lyubimkov L. S., Rachkovskaya T. M., Rostopchin S. I., Lambert D. L.* Surface abundances of light elements for a large sample of early B-type stars - II. Basic parameters of 107 stars // MNRAS. — 2002. — Vol. 333. — P. 9–26.
181. *Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S.* The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction // ApJ. — 1989. — Vol. 345. — P. 245–256.

182. *Eisner J. A., Rieke G. H., Rieke M. J. et al.* Time-monitoring observations of Br γ emission from young stars // MNRAS. — 2015. — Vol. 447. — P. 202–217. 1411.5370.

Приложение А

Оценка неопределенности плотностей потоков в линиях метанола в модели протопланетного диска вокруг звезды типа DM Тельца

Одной из основных особенностей расчетов методом Монте-Карло является наличие шума. Минимальное отношение сигнала к шуму для рассчитанных населенностей уровней метанола, оценка которого получена согласно [90], составляет примерно 1.5×10^8 . Одним из возможных способов оценки уровня шума в синтетических спектрах метанола является вычисление относительно большого количества спектров с одними и теми же параметрами модели и оценка стандартного отклонения этих спектров. Поскольку такие расчеты требуют слишком большого количества процессорного времени, в данном исследовании использовался другой подход. Чтобы оценить уровень шума Монте-Карло при моделировании переноса излучения с помощью LIME, в данной работе были сравнены спектры, рассчитанные тремя последовательными запусками LIME (используя одни и те же параметры модели). Спектры были вычислены с одной и той же пространственной сеткой LIME и схемой уровней метанола $v_t = 0$. В качестве примера, на панели а рисунка А.1 показана разность между дву-

мя спектрами, рассчитанными для «ламинарной» модели диска. Эта разность носит случайный характер, и максимум разности достигается для переходов метанола с частотами выше 800 ГГц. Это означает, что такие переходы чувствительны к неопределенности в населенностях уровней.

Разность между спектрами метанола, рассчитанными тремя последовательными запусками LIME для «ламинарной» модели диска, не превышает 0.01 мЯн. Значение 0.01 мЯн было принято в качестве уровня шума Монте-Карло для спектров, рассчитанных с «ламинарной» моделью диска. Используя тот же подход, была получена оценка уровня шума Монте-Карло для «турбулентной» модели диска 0.02 мЯн.

Неопределенность в синтетических спектрах также может быть связана со случайной природой пространственного распределения точек в сетке LIME. Чтобы оценить эту неопределенность, были вычислены три синтетических спектра метанола с одними и теми же параметрами модели, но с тремя различными реализациями пространственной сетки LIME. В качестве примера, на панели б рисунка А.1 показана разность между двумя спектрами, рассчитанными для «ламинарной» химической модели диска. Разность между этими спектрами носит систематический характер для большинства переходов и пропорциональна интенсивности линии.

Разность между тремя спектрами, рассчитанными для «ламинарной» модели, не превышает 0.05 мЯн. Это значение разности было принято в качестве оценки неопределенности моделируемых плотностей потоков излучения из-за случайности распределения точек в сетке LIME в случае «ламинарной» модели диска. Для «турбулентной» химической модели диска эта неопределенность составляет 1 мЯн.

Результаты расчетов переноса излучения с помощью LIME могут также зависеть от общего числа точек в пространственной сетке LIME. Результаты расчетов, представленные в разделе 1.3, были получены с сеткой LIME, которая включает 10000 точек в пределах модели диска и 10000 точек на границе расчетной области. Для оценки того, как результаты расчетов переноса излучения могут зависеть от числа точек в сетке LIME, были проведены расчеты с более плотной сеткой, которая включает 20000 точек в пределах модели диска и 20000 точек на границе расчетной области.

На рис. А.1в показана разность между пиковыми значениями плотности потока в линиях метанола, которые рассчитаны с пространственной сеткой LIME, включающей 10000 точек, и с более плотной сеткой, включающей 20000 точек,

используя «ламинарную» модель диска. Как может быть видно на рис. А.1в, разность между спектрами, рассчитанными с двумя разными пространственными сетками, не превышает 0.2 мЯн. В случае «турбулентной» модели диска эта разница не превышает 3.0 мЯн.

Важно отметить, что шум Монте-Карло и вариации параметров сетки не приводят к значительным систематическим изменениям в отношениях плотностей потоков в линиях, т.е. высокочастотные линии не становятся значительно более интенсивным или менее интенсивным по сравнению с низкочастотными линиями (см. рис. А.2). Большинство линий, интенсивность которых довольно значительно изменяется из-за шума Монте-Карло и изменений параметров пространственной сетки, относительно слабы или имеют пренебрежимо малую плотность потока.

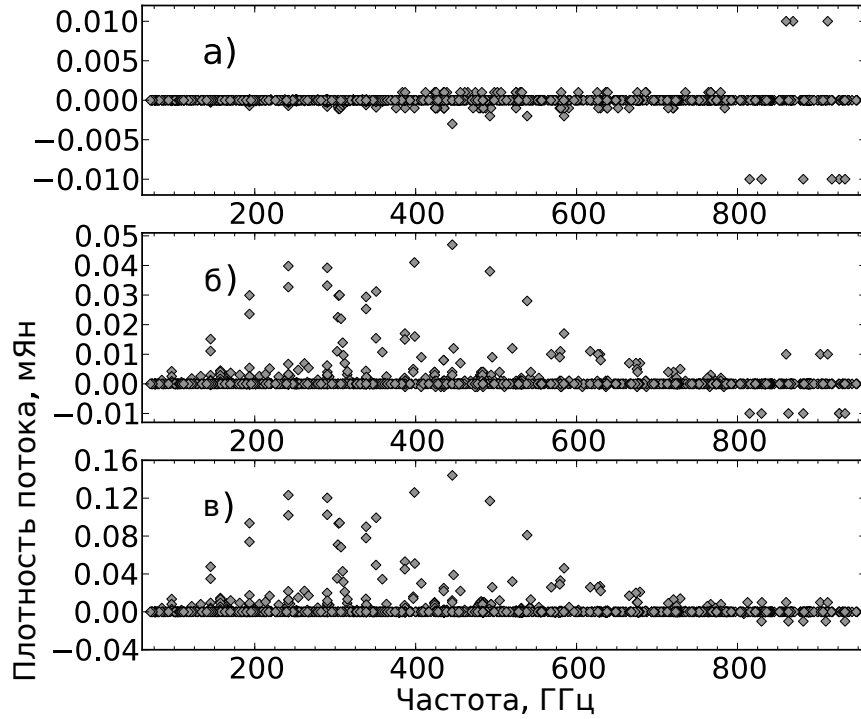


Рисунок А.1: Разность между спектрами, рассчитанными для «ламинарной» модели диска и со схемой уровней метанола $v_t = 0$. а) Разность спектров, рассчитанных при двух последовательных запусках LIME с одними и теми же параметрами модели. б) Разность спектров, рассчитанных при двух последовательных запусках LIME с одними и теми же параметрами, но с разными реализациями пространственной сетки LIME. в) Разность спектров, рассчитанных с двумя разными сетками LIME. Первая сетка включает 10000 точек в пределах модели диска и 10000 точек на границе расчетной области. Вторая сетка включает 20000 точек в пределах модели диска и 20000 точек на границе расчетной области. Результат диссертанта из работы [A1].

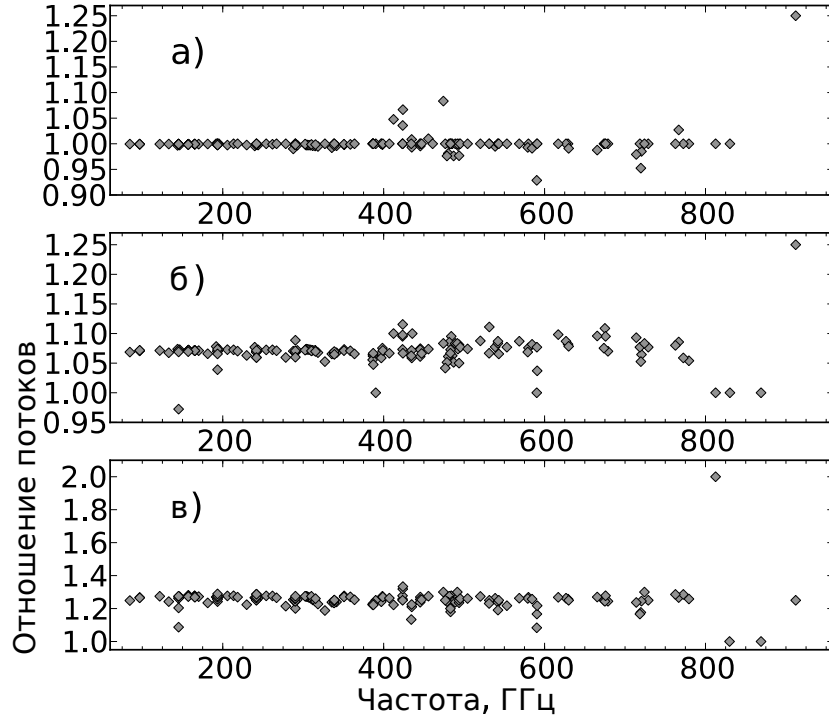


Рисунок А.2: Отношение спектров, рассчитанных для «ламинарной» модели диска и со схемой уровней метанола $v_t = 0$. а) Отношение спектров, рассчитанных при двух последовательных запусках LIME с одними и теми же параметрами модели. б) Отношение спектров, рассчитанных при двух последовательных запусках LIME с одними и теми же параметрами, но с разными реализациями пространственной сетки LIME. в) Отношение спектров, рассчитанных с двумя разными сетками LIME. Первая сетка включает 10000 точек в пределах модели диска и 10000 точек на границе расчетной области. Вторая сетка включает 20000 точек в пределах модели диска и 20000 точек на границе расчетной области. Результат диссертанта из работы [A1].

Приложение Б

Расчет модели аккреционного диска с помощью CLOUDY

Для проведения расчетов модели аккреционного диска в данной работе было изменено стандартное поведение двух входных команд CLOUDY. Первая команда «Nextra CC» используется для учета нагрева за счет вязкой диссипации. В рамках данной работы было сделано так, что темп нагрева, задаваемый этой командой, изменяется не только за счет изменения давления газа, но и с расстоянием от центра диска. Таким образом, третий аргумент измененной версии этой команды может быть произвольным.

Вторая команда — «save transmitted continuum». Эта команда позволяет сохранить сумму звездного излучения, рассеянного окружающим газом, и излучения самого окружающего газа. В рамках данной работы было сделано так, чтобы перед суммированием этих двух типов излучения рассеянное звездное излучение умножается на так называемый covering factor (см. документацию к CLOUDY).

В рамках данной работы также была добавлена новая команда «trace OSCNUM», которая позволяет сохранить среднее число фотонов с некоторой энергией на заданном расстоянии от центра диска. Параметры этой команды: число точек по радиусу в диске, для которых должно быть сохранено среднее число фотонов, и список самих значений расстояния от центра диска в а.е.

Чтобы вычислить физические условия в диске в момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной при $\alpha = 0.00008$ с помощью CLOUDY, были использованы следующие входные команды CLOUDY:

table star Tlusty OSTAR 3-dim temp=29000 log(g)=4.2 logZ=0.0
luminosity 4.155171131720616 solar
table star atlas odnew 3-dim temp=20000 log(g)=4.2 logZ=0.0
luminosity 3.240853810488137 solar
cosmic rays background
abundances HII region no grains
grains Orion function
cylinder log semi height=12.75471480186691
radius 13.45368480620293 16.1749254129166
covering factor 0.09805806756909208
hden 9.8, power =-1.0
iterate 10
stop temperature 3 K linear
set nend 3000
set nchrg 5
age 50 days
set didz -3
set trimming -10 upper
set trimming -14 lower
Hextra SS 0.00008 20 2.78e13
trace OCCNUM 55 10. 15. 20. 25. 30. 32.5 35. 37.5 40. 42.5 45. 47.5 50. 52.5 55. 60.
70. 80. 90. 100. 110. 120. 130. 140. 150. 160. 170. 180. 190. 200. 210. 220. 230. 240.
250. 260. 270. 280. 290. 300. 310. 320. 330. 340. 350. 360. 370. 380. 390. 400. 420.
440. 460. 480. 500.
save physical conditions last "PhysCond.dat"
save grain temperature last "GrainTemp.dat"
save grain abundance last "GrainAbund.dat"
save grain heating last "GrainHeat.dat"
save element last hydr "Hion.dat"
save continuum last "Cont.dat"
save H2 temperatures last "H2Temp.dat"
save molecules last "Mole.dat"

Чтобы вычислить излучение от вещества за ударной волной с $n_H = 10^{13.62} \text{ см}^{-3}$, использовались следующие входные команды CLOUDY:

```
table star Tlusty OSTAR 3-dim temp=29000 log(g)=4.2 logZ=0.0
luminosity 4.155171131720616 solar
cosmic rays background
abundances HII region no grains
cylinder log semi height=11.51848788013858
radius 11.51848788013858 12.47595540770966
covering factor 0.5
hden 13.621
constant temperature, t=30222K linear
iterate 20
stop temperature 3 K linear
age 50 days
print heating
print ages
save physical conditions last "PhysCond.dat"
save element last hydr "Hion.dat"
save continuum last "Cont.dat"
save transmitted continuum last "radiation.txt"
```

Чтобы вычислить физические условия в диске в момент покрытия при $\alpha = 0.00008$ и плотности вещества за ударной волной $10^{13.62} \text{ см}^{-3}$, использовались следующие входные команды CLOUDY (комментарии начинаются с #):

```
table read "radiation.txt"
nuL(nu) = 38.71516846700204 at 0.996143 Ryd
# когда плотность вещества за ударной волной равна
#  $10^{13.32} \text{ см}^{-3}$ 
# последняя команда выше должна быть заменена на
# nuL(nu) = 38.54965303728508 at 0.996143 Ryd
cosmic rays background
abundances HII region no grains
grains Orion function
```


cylinder log semi height=12.75471480186691
 radius 13.45368480620293 16.1749254129166
 covering factor .2181456377060064
 hden 9.8, power =-1.0
 iterate 10
 stop temperature 3 K linear
 set nend 3000
 set nchrg 5
 age 50 days
 set didz -3
 set trimming -10 upper
 set trimming -14 lower
 Hextra SS 0.00008 20 2.78e13
 print heating
 print ages
 trace OCCNUM 55 10. 15. 20. 25. 30. 32.5 35. 37.5 40. 42.5 45. 47.5 50. 52.5 55. 60.
 70. 80. 90. 100. 110. 120. 130. 140. 150. 160. 170. 180. 190. 200. 210. 220. 230. 240.
 250. 260. 270. 280. 290. 300. 310. 320. 330. 340. 350. 360. 370. 380. 390. 400. 420.
 440. 460. 480. 500.
 save physical conditions last "PhysCond.dat"
 save grain temperature last "GrainTemp.dat"
 save grain abundance last "GrainAbund.dat"
 save grain heating last "GrainHeat.dat"
 save element last hydr "Hion.dat"
 save continuum last "Cont.dat"
 save H2 temperatures last "H2Temp.dat"
 save molecules last "Mole.dat"